

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NÁHRADA ELEKTROOHŘEVU PRIMÁRNÍHO VZDUCHU NA STENDU BIOFLUID 100

THE PRIMARY AIR POWER HEAT SUBSTITUTION ON BIOFLUID 100

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

STANISLAV ČUKAT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MAREK BALÁŠ

BRNO 2008

Abstrakt

Tato práce obsahuje v první části základní rozdělení výměníků, obecné principy a zákonitosti výměny tepla, dále pojednává o jednotlivých typech výměníků tepla používaných především v energetické sektoru jejich konstrukcí. V další části práce je řešen návrh výměníku tepla pro ohřev primárního vzduchu odpadním teplem plynu generovaného na standu Biofluid 100.

Klíčová slova: Výměníky tepla, prostup tepla, čištění výměníku tepla, trubkový výměník tepla.

Abstract

Initial section of this paper discusses the basic classification of exchangers and general principles and laws of heat exchange. Second section outlines the individual types of heat exchangers, used predominantly in the power industry. The final section of the paper offers a design proposal for heat exchangers for primary air heating by waste gas energy, generated by stand Biofluid 100.

Key words: Heat exchangers, heat transmission, heat exchangers cleaning, tube heat exchanger.

Bibliografická citace

ČUKAT, S. *Náhrada elektroohřevu primárního vzduchu na standu Biofluid 100* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Baláš

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Marka Baláše a použil jsem literárních pramenů a informací, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Brně dne 22.5.2008

.....

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Markovi Balášovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení, cenné rady, ochotu a pomoc při zpracování této práce.

Obsah

Obsah	7
1.0 Úvod	8
2.0 Teorie výměníků tepla	9
2.1 Rozdělení výměníku tepla	9
2.1.1 Rozdělení výměníků podle způsobu přenosu tepla	9
2.1.2 Rozdělení výměníků podle pracovního pochodu	10
2.1.3 Rozdělení výměníků podle vzájemného směru a smyslu proudění teplonosných médií	10
2.1.4 Rozdělení výměníků podle účelu a použití	11
3.0 Konstrukční řešení výměníků tepla	14
3.1 Výměníky rekuperační	14
3.1.1 Rekuperační trubkové výměníky tepla	14
3.1.1.1 Základní části trubkových výměníků	15
3.1.1.2 Jednotlivé typy rekuperačních trubkových výměníků tepla	16
3.1.1.3 Kompenzace používané u výměníků s rovnými trubkami	18
3.1.2 Rekuperační výměníky deskové	21
3.1.2.1 Rozebíratelné deskové výměníky tepla	21
3.1.2.2 Pájené deskové výměníky	23
3.1.3 Spirálový výměník	25
3.2 Výměníky regenerační	26
3.2.1 Ljungströmov ohřívák	26
3.3 Výměníky směšovací	27
3.3.1 Vstřikovací chladič páry	27
3.3.2 Nízkotlaký odplynovák	27
4.0 Čištění a provoz výměníků	28
4.1 Hlavní příčiny způsobující poruchy výměníků	29
4.2 Čištění výměníků	31
4.2.1 Chemické čištění	31
4.2.2 Mechanické čištění	32
4.2.3 Tepelné čištění	34
4.2.4 Speciální typy čištění	34
4.2.5 Ofukovače a ostříkovače	34
5.0 Experimentální jednotka Biofluid 100	35
6.0 Výpočet výměníku	36
6.1 Zadání	36
6.2 Výpočet geometrických rozměrů trubkového výměníku	37
6.3 Tepelný výpočet výměníku	38
6.3.1 Střední logaritmický teplotní spád	39
6.3.2 Prostup tepla	40
6.3.2.1 Součinitel přestupu tepla v trubkovém prostoru	40
6.3.2.2 Součinitel přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru	42
6.3.2.3 Součinitel prostupu tepla	43
6.3.3 Výpočet výhřevné plochy	43
6.3.4 Úprava rozměrů konečný návrh	44
7.0 Závěr	45
Seznam použité literatury	45
Informace v síti INTERNET	45
Seznam použitých veličin	46

1.0 Úvod

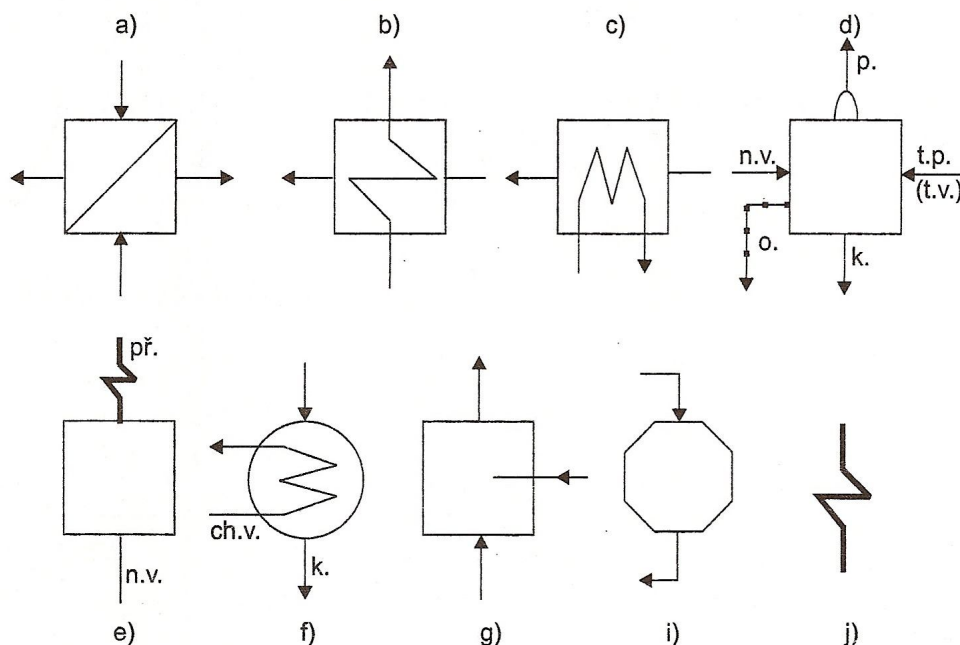
Energetika je stále rozvíjející se odvětví a důležitá součást ekonomiky a hospodářství. Růst ceny energií a stále zvyšující se poptávka po ní zapříčiňují, že jsou na energetické zařízení a jejich provoz kladeny vysoké požadavky jak z hlediska, účinnosti tak z hlediska ekologického dopadu životní prostředí.

Výměníky tepla jsou důležitou součástí energetických zařízení a využívají se však nejenom v energetickém sektoru, ale také především v chemickém průmyslu, dále v potravinářství, chladirenství, plynárenství a mnoha dalších odvětvích.

Je mnoho typů výměníků tepla vhodných pro různá prostředí a pracovní látky. Tato práce obsahuje v první části základní rozdělení výměníků, obecné principy a zákonitosti výměny tepla, dále pojednává o jednotlivých typech výměníků tepla používaných především v energetické sektoru jejich konstrukcí. V další části práce je řešen návrh výměníku tepla pro ohřev primárního vzduchu odpadním teplem plynu generovaného na standu Biofluid 100. Tento návrh se skládá s výpočtu geometrických parametrů výměníku a tepelného výpočtu a jeho cílem je naléznout optimální variantu výměníku pro toto zadání.

2.0 Teorie výměníků tepla

Výměníky tepla jsou zařízení sloužící k průběžnému nebo přerušovanému předávání tepelné energie pomocí proudících médií. Rozeznávají se výměníky tepla povrchové, činné tekutiny jsou odděleny stěnou k výměně tepla dochází přes teplosměnnou plochu. Dále to jsou výměníky kontaktní k výměně tepla dochází na ploše vytvořené hladinou kapaliny a výměníky směšovací, u kterých nastává úplné promísení obou tekutin. Zvláštní skupinou jsou výměníky tepla regulační, se střídavým stykem činné plochy s oběma tekutinami. V tepelných schématech se zobrazují výměníky normalizovanými symboly.



Obr. 2.1 Značení výměníků v tepelných schématech [1]

a,b - rekuperační výměník obecně, c - chladič, d - odparka, e - parní kotel s přehřívákem, f - kondenzátor, g - směšovací výměník, h - chladič věž, i - přehřívák páry, n.v.- napájecí voda, o. - odluh (solemi zahuštěná voda), k. - kondenzát, p.- sytá pára, př. - přehřátá pára, ch.v. - chladič vody, t.p. - topná pára

2.1 Rozdělení výměníku tepla

2.1.1 Rozdělení výměníků podle způsobu přenosu tepla

Konvekční - Při proudění (neboli konvekci) dochází k přenosu tepla v důsledku proudění a promíchávání různě ohřátých částí hmoty. Průběh pochodu je silně ovlivňován charakterem proudění. K intenzivnějšímu přenosu tepla makročásticemi dochází při proudění turbulentním. Přenos tepla při přirozené (volné) konvekci je doprovázen prouděním vznikajícím vlivem rozdílu hustot médií. Nucená konvekce při vynuceném, uměle vyvolaném pohybu tekutiny např. ventilátorem nebo čerpadlem.

Sálavé (radiální) - Při tepelném záření (neboli sálání či radiaci) dochází k vyzařování energie ze zdroje ve formě elektromagnetických vln a jeho následnému pohlcování ozařovaným tělesem. Uplatňuje se převážně v rozsahu teplot nad 500°C v zařízeních, kde povrchy výměny tepla mají značně rozdílné teploty.

Kombinované - Ve skutečnosti dochází k jednotlivým způsobům přenosu tepla samostatně jen zřídka, ve většině případů se jedná jejich vzájemnou kombinaci. Při řešení uvažujeme převažující způsob přenosu tepla.

2.1.2 Rozdělení výměníků podle pracovního pochodu

Výměníky regenerační

Ohřívání médium opakovaně vtéká s určitým časovým zpožděním za médiem ohřívajícím do vymezeného prostoru vyplněného pevným teplo zprostředkujícím elementem a přejímá z něho teplo dříve přivedené ohřívajícím médiem.

Výměníky rekuperační

Obě tekutá média jsou (ohřívající a ohřívané) jsou rozdělena stěnou o určité tloušťce a výhřevných plochách

Výměníky směšovací

Obě média (ohřívání, ochlazování) se ve výměníku směšují – teplosměnná plocha je dána např. povrchem kapek vstříkované vody. V mnoha případech doprovázeno současným přenosem hmoty.

2.1.3 Rozdělení výměníků podle vzájemného směru a smyslu proudění teplotných medií

Souproudé - vzájemný pohyb (proudění) dvou teplotných látek stejným směrem podél teplosměnné plochy výměníku tepla.

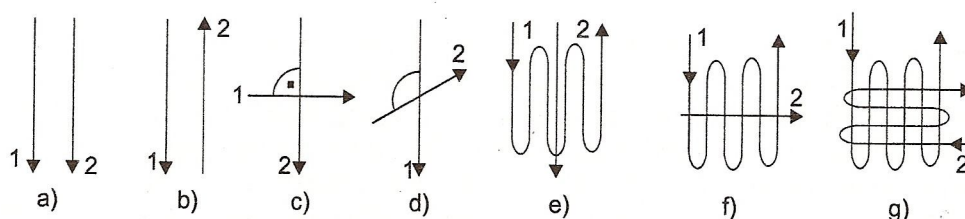
Protiproudé - vzájemný pohyb (proudění) dvou teplotných látek (ohřívající a ohřívání) podél teplosměnné plochy výměníku tepla, rovnoběžný v opačných směrech.

Křížové - osy proudů jsou mimoběžné v kolmém průmětu spolu svírají úhel 90

Se šikmým vzájemným proudem - osy proudů v kolmém průmětu spolu svírají úhel menší nebo větší než 90

Vícenásobně souproudé, protiproudé a křížové proudění (viz obrázek 2.2 e-g)

S kombinovaným prouděním (viz obrázek 2.2 e-g)



Obr. 2.2 Proudění ve výměnících [1]

a - souproud, b - protiproud, c - křížový proud, d - šikmý proud, e až g - kombinované proudění

2.1.4 Rozdělení výměníků podle účelu a použití

Ohřívák vzduchu

U ohříváků se zvyšuje teplota ohřívaného média, ale nedochází ke změně skupenství. U kotlů slouží k předběžnému ohřátí vzduchu. Do topeniště proudí normálně studený vzduch, má-li se však dosáhnout vyšší spalovací teploty, je nutné pod rošt nebo do spalovacího prostoru přivádět vzduch ohřátý. Za tímto účelem se dá použití odpadního tepla kouřových plynů k ohřátí vzduchu a tím i zlepšit tepelné hospodářství kotelny. Podle způsobu přenosu tepla rozlišujeme rekuperační a regenerační ohříváky. V rekuperačním ohříváku jsou spaliny od ohřívaného vzduchu odděleny pevnou stěnou, u regeneračních ohříváků se teplo přenáší prostřednictvím akumulací části, která je střídavě ohřívána spaliny a ochlazována vzduchem.



Obr. 2.3 Ohřívák vzduchu - Elektrárna Kolín [www.profitall.cz]

Regenerační ohřívák vzduchu

Je tepelný výměník využívající teplo odcházejících spalin k ohřátí spalovacího vzduchu. Součástí regeneračního ohříváku je akumulací prvek, který se střídavě nahřívá spaliny a ochlazuje nahříváním vzduchem. Mezi nejpoužívanější regenerační přehříváky patří Ljungströmův ohřívák. Akumulací prvkem je válec složený z plechů, který se otáčí a je střídavě nahříván spaliny či chlazen vzduchem.

Ljungströmův regenerační ohřívák vzduchu

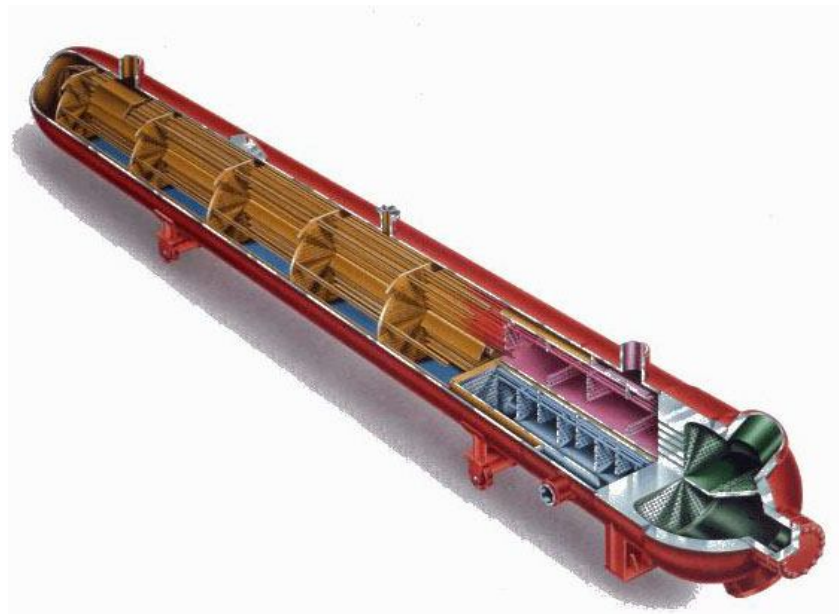
Zařízení sloužící pro ohřívání spalovacího vzduchu parního kotle.



Obr. 2.4 Ljungströmův regenerační ohřívák [www.energysolutionscenter.org]

Ohřívák napájecí vody - Ekonomisér

Ohřívák napájecí vody pro parní kotel. Voda prochází v ekonomiséru řadou svislých trubek a kouřové plyny před vstupem do komína proudí mezi trubkami a vodu ohřívají. Teplota plynů, odcházejících z ekonomiséru, nemá být pod 150°C, aby se tah v komíně příliš nesnížil, a vstupní teplota napájecí vody nemá být nižší než 35°C, aby se pára na trubkách nesrážela. Ekonomisérem se ušetří 10 až 15 % paliva.



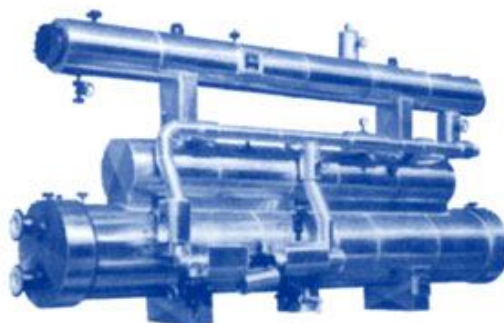
Obr. 2.5 Ekonomisér [www.mgt-inc.com]

Chladiče

Snižují teplotu ochlazovaného média beze změny fáze

Výparníky a odparky

U výparníků a odparek se kapalné médium se mění v páru. Výparník je část parního kotle, případě parního generátoru, ve kterém se přívodem tepla vyrábí z ohřáté napájecí vody sytá pára. Do výparníku vstupuje voda předehřátá na teplotu sytosti, takže dodávané teplo slouží k tvorbě páry za stálého tlaku. Voda se ve výparníku vypařuje při konstantní teplotě, teplotě sytosti. Výparník klasického parního kotle sestává z vertikálních trubek, které vychlazují spalovací prostor kotle. Odparka, povrchový výměník tepla vytápěný párou, ve kterém se vyrábí pára o nízkém tlaku, jejíž kondenzát se používal jako přídatná voda pro úpravu napájecí vody v parních elektrárnách (dnes nahrazeno úpravou demineralizací), nebo ve kterém se odpařováním zahušťují roztoky.



Obr. 2.6 Kotelový výparník [www.bvfcompany.com]

Kondenzátory

Teplejší médium ve formě páry se sráží a vzniká kondenzát. Kondenzátor je výměník tepla, ve kterém se sráží pára odváděním tepla obvykle chladicí vodou. Pára je přiváděna do kondenzátoru z posledního stupně parní turbíny. Podle konstrukce například - kondenzátory povrchové směšovací, barometrické, ejektorové.



Obr. 2.7 Kondenzátory [www.directindustry.com]

Přehříváky a mezipřehříváky

Přehřívák páry je trubkový výměník tepla s přívodem tepla ze spalín sáláním a konvekcí (u parního kotle) nebo konvekcí z teplotnosné látky (chladiva) primárního (chladicího) okruhu jaderného reaktoru. Sestává z trubkových hadů zavěšených v některém tahu kotle. Uvnitř trubek proudí ohřívána pára, vně trubek horké spaliny. Obvykle je složen z několika sekcí.

Sušárny

Přísunem tepla se dosahuje snížení vlhkosti látky v pevné fázi.

Termické odplyňovány vody

Ohřevem vody k bodu varu dochází k vyloučení pohlcených plynů. Odplyňovák tvoří v parní elektrárně též jeden stupeň regeneračního ohřevu.

Topná tělesa ústředního vytápění

Topná tělesa jsou zařízení, z nichž se teplo předává pro otop místnosti. Nejčastěji se tímto obecným výrazem rozumí topná tělesa ústředního topení (radiátory). Ústřední vytápění může být pro větší počet místností z jediného ústředního topeniště, umístěného v téže budově. Větší podniky mají ústřední topení i pro více budov ne příliš od sebe vzdálených. Pro jednotlivé byty zřizují se topení etážová nebo skupinová charakterizovaná tím, že topeniště je v témže podlaží jako topná tělesa.



Obr. 2.8 Objektová výměňková stanice [www.reliance.cz]

3.0 Konstrukční řešení výměníků tepla

Hlavními požadavky na výměník jsou co nejmenší rozměry hmotnost a cena. Dále co nejmenší tlakové ztráty a co nejvyšší spolehlivost v provozu. V počátečních fázích navrhování je nutné zvážit, které zařízení z celé skupiny známých zařízení na výměnu tepla je pro daný účel nejvhodnější. Vhodné řešení je vždy kompromisem mezi těmito požadavky.

3.1 Výměníky rekuperační

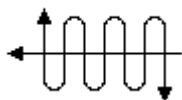
Použití zejména jako vysokotlaké a nízkotlaké ohříváky napájecí vody, chladiče kondenzátu, chladiče oleje, kondenzátory parních turbín, spalínové výměníky a další.

Podle skupenství

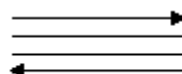
- bez změny skupenství teplotnosných látek
- se změnou skupenství jedné s teplotnosných látek
- Se změnou skupenství obou teplotnosných látek

Podle proudění

- omývání příčné

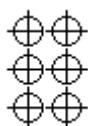


- omývání podélné



Podle uspořádání trubek

- trubky za sebou



- trubky přesazené



Podle konstrukční řešení výhřevné plochy

- a) Výměníky trubkové
- b) Výměníky deskové
- c) Výměníky s žebrovanými povrchy

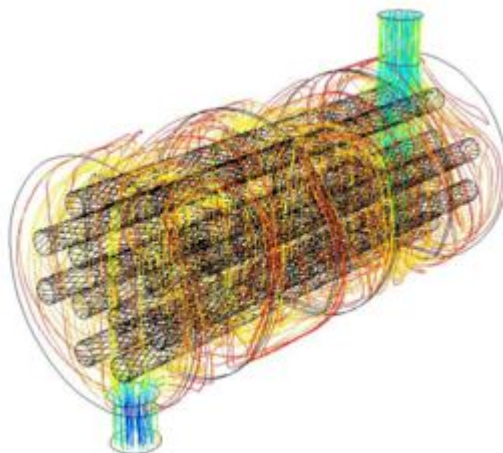
3.1.1 Rekuperační trubkové výměníky tepla

V trubkovém výměníku proudí dvě média o různých počátečních teplotách. Jedno proudí v trubkách a druhé proudí mimo trubky uvnitř pláště výměníku. Teplo je přenášeno z jednoho média na druhé přes stěny trubky (z trubky do mezitrubkového prostoru nebo naopak). Pracovní látkou v trubkovém výměníku mohou být kapaliny i plyny.

Trubkové výměníky tepla

- plášťový výměník s rovnými trubkami
- článkový trubkový výměník
- výměník dvoutrubkový
- vlásenkový výměník s U-trubicemi (vertikální bojler)
- výměník se šroubovitě vinutými trubkami
- trubkové výměníky s žebrováním

Trubkové výměníky jsou nejčastějším typem výměníků, který je vhodný i pro vysoké tlaky a teploty, použitelné pro plyny i kapaliny. Tyto výměníky poskytují celkem široký rozsah výměny tepla k jejich objemu.



Obr. 3.1 Simulace proudění média ve výměníku [www.wikipedia.org]

Simulace proudění tekutiny v plášťovém výměníku. Přítok média do mezitrubkového prostoru je umístěn nahoře v zadní části a odtok ve přední části dole.

3.1.1.1 Základní části trubkových výměníků

Svazek trubek - základní část vytváří plochu pro přenos tepla. Trubky jsou buď hladké nebo žebrované. Na obou koncích jsou zachycené do trubkovic (u typu s U-trubicemi pouze jedna trubkovnice) buď zaválcováním do radiálních drážek (u nízkotlakých výměníků zaválcováním bez drážek) nebo jsou k trubkovnici z vnějšku přivařeny.

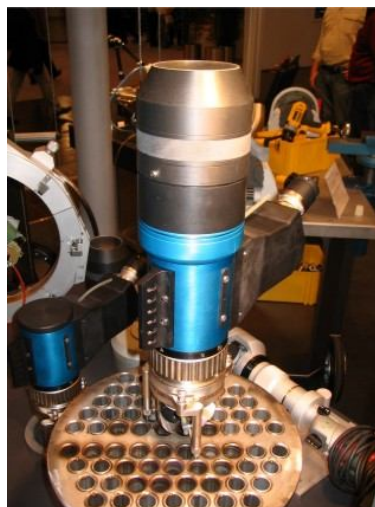


Obr. 3.2 Svazek trubek [www.ami-exchangers.co.uk]

Trubkovnice - Kruhová deska s otvory pro trubky. K plášti bývá přišroubována nebo přivařena.



Obr. 3.3 Trubkovnice výměníku pro využití odpadního tepla [www.termol.cz]



Obr. 3.4 Výroba trubkovnice [www.alfain.eu]

Plášť - Vyroben svinutím kovového lubu vhodných rozměrů do tvaru válce a svařen podélným svarovým spojem. U malých průměrů (do 0,6 m) lze použít bezešvé trubky v potřebné délky.



Obr. 3.5 Plášť výměníku [www.termol.cz]

Hrdla a komory mezitrubkového prostoru - slouží pro vstup a výstup látky obsažené v trubkách. Vyrábějí se z legovaných materiálů, popř. jsou opatřeny plátováním z nízkouhlíkaté oceli.

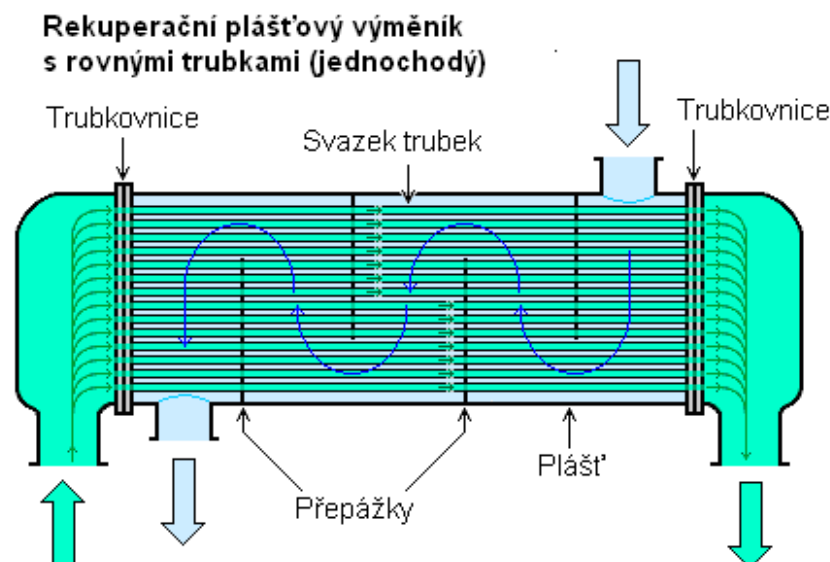
Víka - uzavírají komory tak, že trubky a trubkovnice mohou být zpřístupněny bez demontáže zařízení

Přepážky - Podpírají trubky, aby se neohýbali a nechvěly a usměrňují proud média. Nejobvyklejší jsou přepážky segmentové. Dále to jsou například tyčové a šroubovicové systémy přepážek.

3.1.1.2 Jednotlivé typy rekuperačních trubkových výměníků tepla

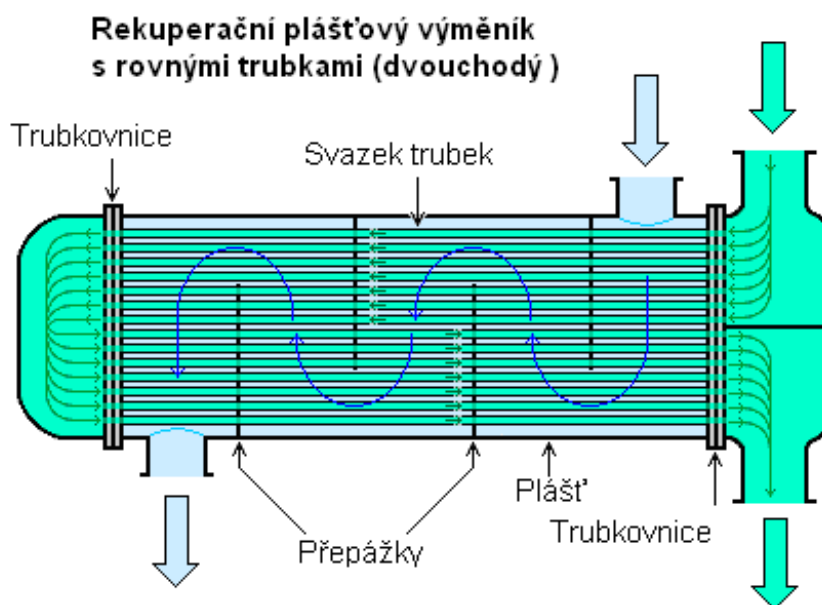
Rekuperační plášťový výměník s rovnými trubkami

Je to nejstarší typ výměníku. Skládá se z vnějšího pláště do něhož jsou přivařeny trubkovnice, ve kterých jsou zaválcovány trubky. Materiál trubek bývá zpravidla ocel nebo mosaz a tloušťky stěn bývají 1,5 – 2,5 mm. V mezitrubkovém prostoru jsou nainstalovány přepážky (segmentové, koncentrické), které zpomalují pohyb vnějšího média.



Obr. 3.6 Schéma výměníku s rovnými trubkami (jednochodý) [www.wikipedia.org]

Kondenzátory v elektrárnách bývají často jedno chodé výměníky tepla s rovnými trubkami, ale dvou a čtyř chodé výměníky jsou častější, poněvadž tekutina může do výměníku vstoupit i vystoupit na stejné straně. To dělá konstrukci mnohem jednodušší.



Obr. 3.7 Schéma výměníku s rovnými trubkami (dvouchodý) [www.wikipedia.org]

Protiproudé výměníky tepla jsou oproti souproudým účinnější, protože mají obvykle vyšší střední logaritmický teplotní spád.

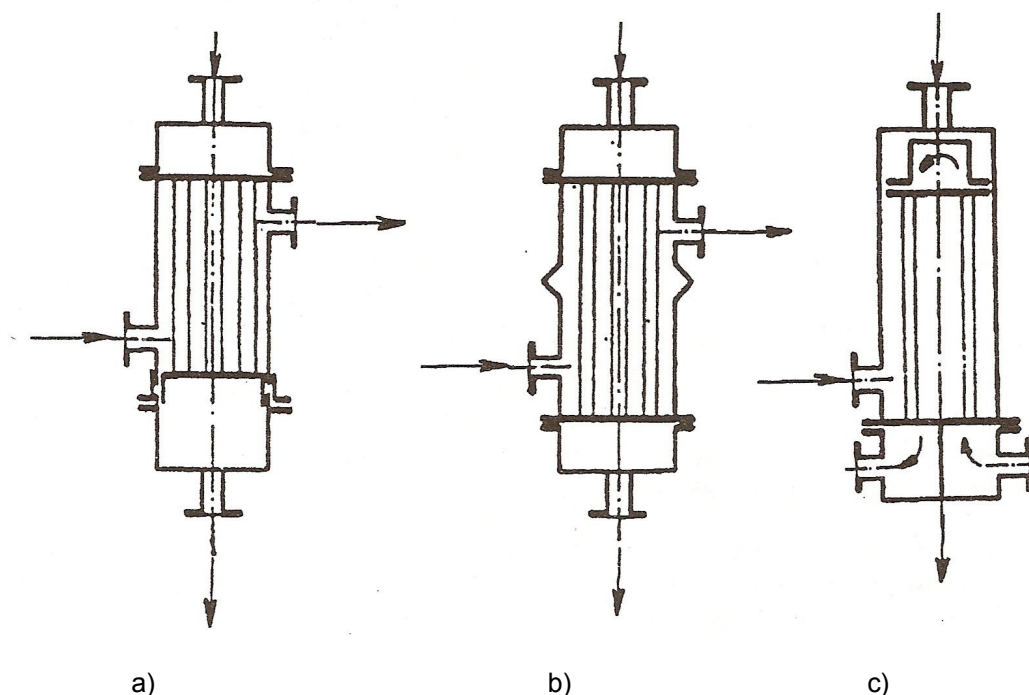
Rekuperační článkový trubkový výměník

Jedná se o protiproudý výměník s podélným omýváním vnějšího povrchu.

Rekuperační výměník dvoutrubkový

Výhody výměníku s rovnými trubkami je především jednoduchá výroba, dobré podmínky pro mechanické čištění, možnost výměny poškozené trubky. Dále je to také možnost minimální tloušťky stěny, což vede ke snížení hmotnosti. Hlavní nevýhodou tohoto typu výměníku je problém s teplotní dilatací trubek mezi pevnými trubkovnicemi. Použití tohoto typu výměníku je omezeno na nižší teplotní rozdíly a tlaky obou pracovních médií. Výměníky mohou vertikální i horizontální. Aby bylo možné použít trubkové výměníky pro vyšší parametry je nutné provádět kompenzace.

3.1.1.3 Kompenzace používané u výměníků s rovnými trubkami

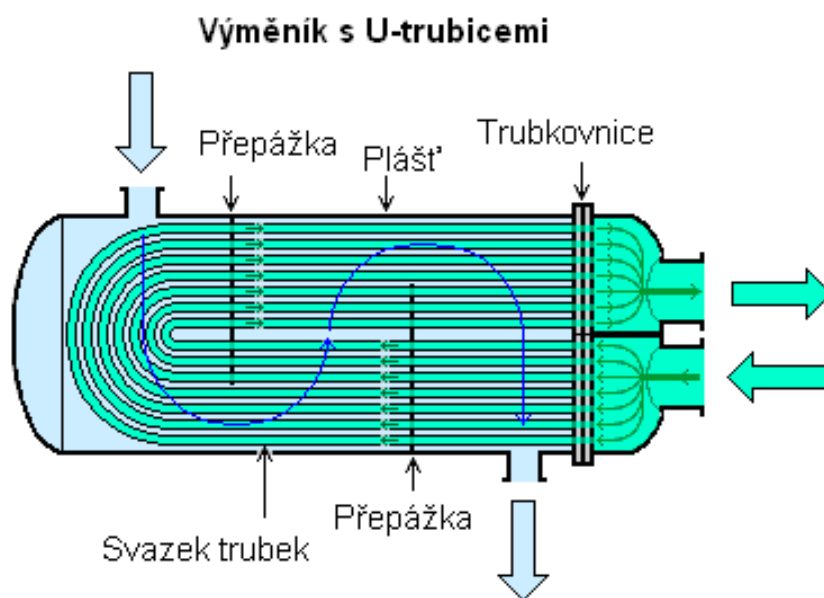


Obr. 3.8 Příkladů jednotlivých kompenzací [1]

a - kompenzace s ucpávkou, b - kompenzace pružným zvlněním pláště, c - kompenzace s plovoucí hlavou

Rekuperační vlásenkové výměníky s U-trubicemi

Výhody U-trubek je, že nevznikají problémy s teplotními dilatacemi, používají se trubky malých průřezů a tloušťek s čehož vyplývá nižší hmotnost výměníku. Svazek trubek dobře využívá prostoru pláště. Jednou z hlavních nevýhod je nemožnost mechanického čištění vnitřního povrchu trubek a nemožnost výměny poškozené trubky. Při použití vyšších tlaků narůstá tloušťka trubkovnice a je potřeba zvláštní tepelné postupy pro její výrobu.



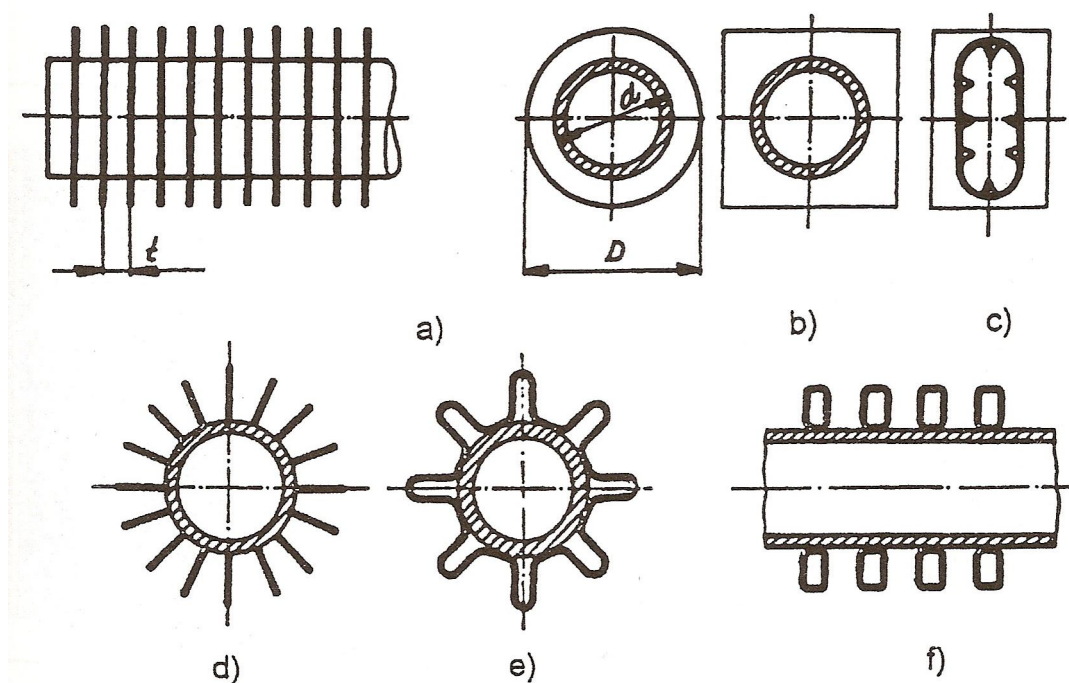
Obr. 3.9 Schéma výměníku s U-trubicemi [www.wikipedia.org]

Rekuperační výměník se šroubovitě vinutými trubkami

Trubky mohou být vedeny i ve více řadách. Výhodou těchto výměníků je jednoduchá výroba a využití čistého protiproudu při zachování příčného obtékání trubek. Nevýhodou je, že trubka je z jednoho kusu a při případné opravě je nutné vyměnit ji celou.

Rekuperační výměníky s žebrováním

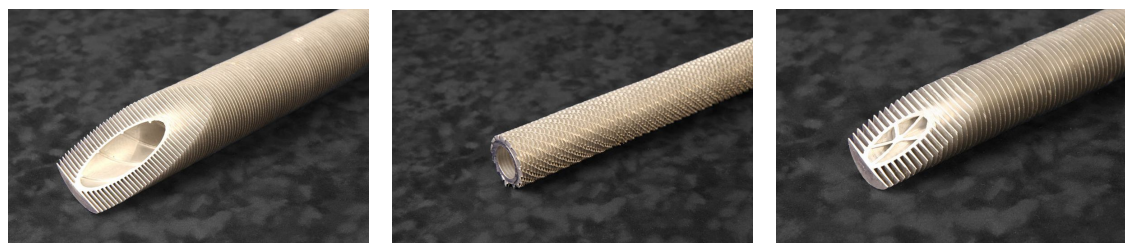
Žebrováním se docílí zvětšení teplosměnného povrchu (činnou plochu pro výměnu tepla mohou zvětšit 2,5-3 krát), zvětšení tepelného toku trubkou, ke snížení ztráty média na straně žebířů v důsledku menšího počtu řad trubek. Žebrování může být jak na vnějším tak i na vnitřním povrchu trubek. Žebra mohou být příčná podélná nebo šroubovitě vinutá. Podélná vnější žebra se používají výhradně v případě podélného obtékání trubek, jsou vysoká 10 až 25 mm a k trubce jsou švově přivařena jejich počet může být 20 až 48. Žebra příčná se používají při příčném obtékání trubek a mohou být buď nízká (1,6 mm o počtu žebířů 760 na 1 m) nebo středně vysoká (3,2 mm o počtu žebířů 440 na 1 m). Vnitřní ožebrování tvořené podélnými žebry lze doporučit pro libovolný druh proudění. Vnitřní ožebrování mohou být nízká (1-2 mm) nebo vysoká (až 0,5 průměru trubky).



Obr. 3.10 Základní druhy žebrovaných povrchů [1]

a,b - trubka s kruhovými a čtvercovými žebry, c - litinová trubka s vnitřními a vnějším žebrováním, d - podélné žebrování, e - páskové žebrování podélné, f - žebrování z drátových profilů

Příklady žebrovaných trubek



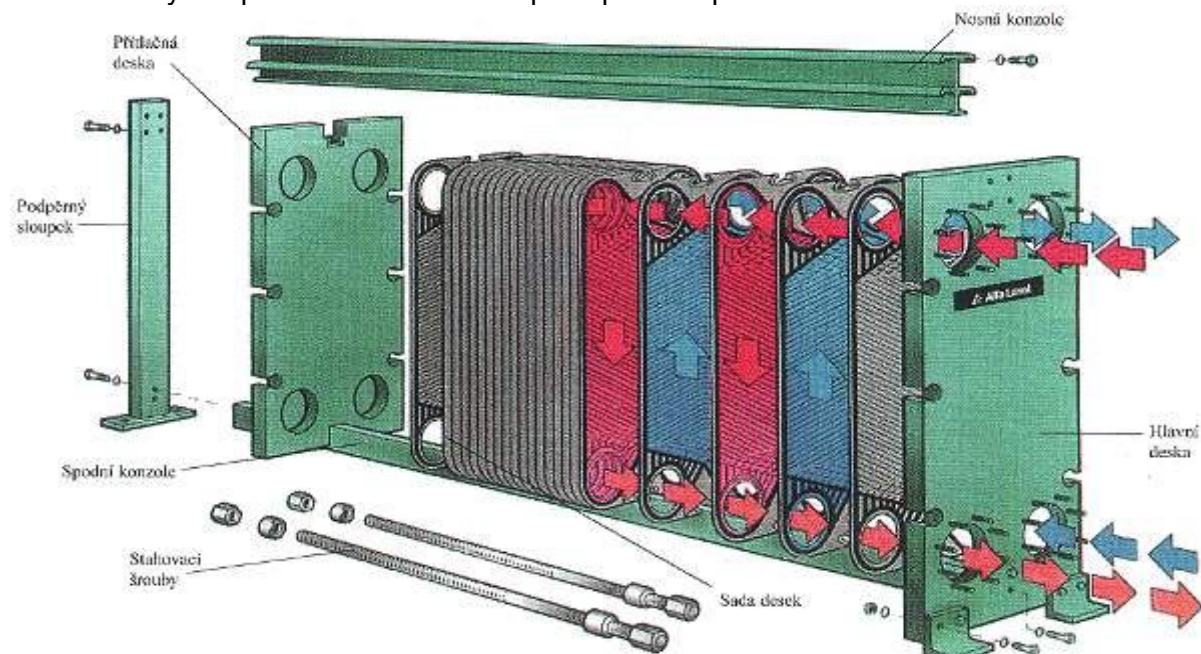
Obr. 3.11 Příklady trubek s vnitřním i vnějším žebrováním [www.zebrovanetrubky.cz]

Materiál trubky

Hlavním požadavkem na materiál trubky je schopnost dobrého převodu tepla, proto by měl mít materiál, ze kterého je trubka vyrobena, dobrou tepelnou vodivost. Teplo je převáděno z teplého do studeného prostředí přes stěnu trubky. Vznikají teplotní rozdíly v šířce trubky. Materiál trubky by měl dále odolávat rozdílným teplotám a tlakům nebo například nepříznivému pH pracovních látek. Nevhodný výběr materiálu trubek, může mít za důsledek špatné těsnění mezi trubkou a mezitrubkovým prostorem výměníku a to může mít za následek mísení znečištěných kapalin a možnost ztráty tlaku.

3.1.2 Rekuperační výměníky deskové

Deskový výměník tepla se skládá ze sady tenkých kovových desek, seřazených za sebou, které jsou k sobě pájené nebo jsou staženy pomocí šroubů mezi hlavní a přitlačnou deskou. Mezi jednotlivými deskami je těsnění a tak je vytvořen systém dvou oddělených mezideskových prostorů - kanálů pro průtok primárního a sekundárního média.



Obr. 3.12 Princip deskového výměníku [www.bcb-plzen.eu]

Ze schématu průtoku primárního a sekundárního média je patrné, že každé médium prochází svým systémem kanálů, tvořených utěsněnými mezideskovými prostory. Primární médium vstupuje do levé horní příruby v pevné nosné desce a každým druhým mezideskovým prostorem protéká dolů, kde opouští výměník levou dolní přírubou. Sekundární médium naopak z pravé dolní příruby protéká svými mezideskovými kanály nahoru a vychází pravou horní přírubou. Toto uspořádání je velice efektivní, protože obě média procházejí výměníkem přesně opačným směrem, jedná se tedy o čistý protiproud. Dále jsou všechny desky jsou prolisovány tak, aby v proudícím médiu docházelo k velké turbulenci a to společně s malou tloušťkou stěny vede k malým rozměrům a hmotě, což je výhodné z hlediska přestupu tepla a kompaktnosti řešení. Je možno říci, že deskové výměníky tepla mívají 3 až 5 krát vyšší účinnost než výměníky trubkové.

3.1.2.1 Rozebíratelné deskové výměníky tepla

Nacházejí uplatnění téměř ve všech průmyslových oborech. Tyto výměníky jsou charakteristické tím, že jejich jednotlivé desky jsou od sebe ve výměníku odděleny těsněním a je tedy možné rozebrat výměník na jednotlivé kusy. Možnost rozebrání je výhodná především u těch médií, která jsou nějakým způsobem znečištěna a tyto nečistoty ulpívají na teplosměnné ploše výměníku. Další z výhod je možnost navýšení výkonu výměníku doplněním desek do stávajícího rámu, který je navržen tak, aby odolával požadovanému provoznímu tlaku.



Obr. 3.13 Rozebíratelný deskový výměník [www.sato-praha.cz]

Tato konstrukce díky vysoké elasticitě těsnění snáší dobře cyklické zatěžování. Desky použité ve výměnících mají několik typů prolisování. Použití typu prolisů je věcí návrhu výměníku.

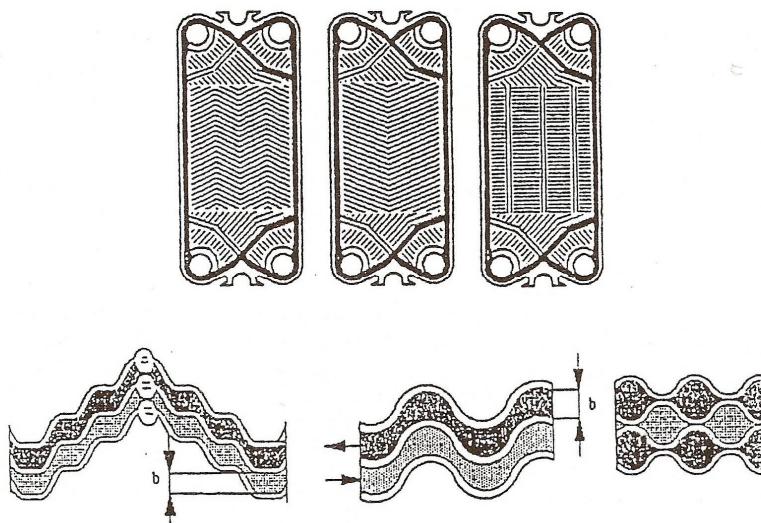
Materiál desek

Desky jsou lisovány z plechů tloušťky 0,4-1mm. Maximální mezera mezi deskami bývá zpravidla 3-5 mm. Používané materiály desek jsou, nerezová ocel, speciální materiály Incoloy nebo Hastelloy, titan a jeho slitiny, nikl a jeho slitiny, grafitové kompozity, tantal a jiné.



Obr. 3.14 [www.bcb-plzen.eu]

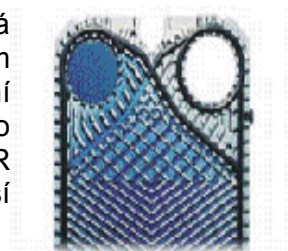
Příklady zvlnění a žlábkování jednotlivých desek



Obr. 3.15 Příklady zvlnění a žlábkování jednotlivých desek [1]

Materiál těsnění

Při použití výměníků s těsněním je nutné dodržovat určitá pravidla v závislosti na teplotě a druhu použitého média. Při stálém překročení teploty dochází k rychlému stárnutí těsnění. Těsnění jsou upevňována buď lepením speciálními lepidly nebo mechanickým systémem uchycení. Používané materiály NBR (nitrilová pryž), modifikace nitrilové pryže pro vyšší nebo nižší teploty, Viton, Hypalon, Neopren, azbestová vlákna, nitril a další



Obr. 3.16 Těsnění deskového výměníku [www.bcb-plzen.eu]

Profil těsnění

Bývá navržen tak, aby při maximální provozní živnosti těsnění (s ohledem na relaci teplota/tlak) vyrovnával rozdíly teplotních dilatací mezi deskovým souborem a stahovacími šrouby. Konstrukce vychází ze skutečnosti, že deskový soubor z nerezové oceli s pryžovým těsněním reaguje na změny teploty odlišně, než systém stahovacích šroubů a přítlačných desek z konstrukční oceli. Soubor desek výměníku je stažen s předpětím, které odpovídá provoznímu tlaku. Při prudké změně provozních podmínek může dojít k poklesu předpětí až pod minimální hodnotu; tato skutečnost má nepříznivý vliv na životnost těsnění a tento vliv roste s předpětím, tedy s provozním tlakem.

Izolace rozebíratelných deskových výměníků tepla

Základním prvkem izolace je skelet z hliníkového plechu. Ten se je složen z několika dílů podle typu výměníku tak, aby bylo možno izolaci lehce nasadit i sejmout bez nutnosti demontáže výměníku. Skelet je vyplněn izolační hmotou.

Izolace pro vytápění - skelet může být vyplněn izolační hmotou na bázi minerální vaty

Izolace pro chlazení - skelet je vyplněn izolační hmotou na bázi polyuretanu s ochranou vrstvou proti kondenzační vlhkosti

Stojany

Stojany výměníků jsou konstruovány pro různé provozní tlaky. Povrchová úprava u celonerezových stojanů je prováděna leštěním. Balotinou u stojanů z uhlíkové oceli s povrchem chráněným nátěrem.

Maximální provozní hodnoty

Maximální provozní hodnoty rozebíratelných deskových výměníků tepla se liší podle typu a výrobce a jsou uvedeny v technické specifikaci výměníku. Nejvíce se však využívají deskové výměníky pro ohřev kapalin při provozních tlacích 3,5 MPa a při teplotách 220 °C. Některé typy však pracují i s vyššími tlaky a teplotami.



Obr. 3.17 Příklad zapojení rozebíratelného deskového výměníku [www.g-mar.cz]

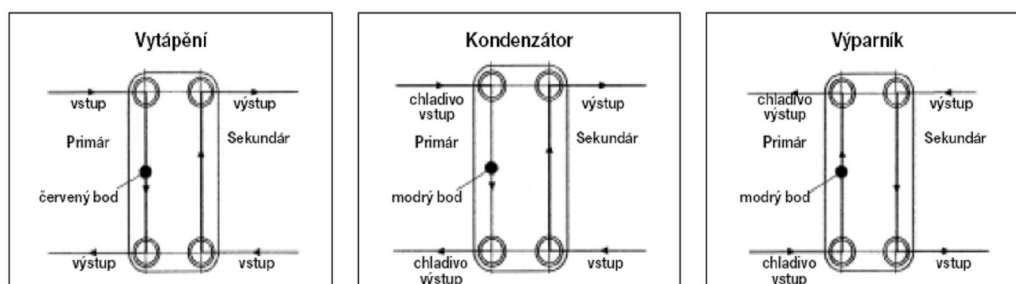
3.1.2.2 Pájené deskové výměníky

Desky v těchto výměnících bývají z nerezové oceli a jsou spolu neoddělitelně spojeny měděnou nebo niklovou pájkou. Desky mají profilovaný povrch jako u rozebíratelných deskových výměníků. Z důvodu nerozebíratelné konstrukce a relativně malých mezer mezi deskami výměníku je tento typ výměníků je vhodné používat pro média s co nejmenším množstvím pevných částic jako například u horkovodů, ústředního vytápění a jiných. Jestliže dochází ke znečištění médií nebo je jako médium použita teplá užitková voda obsahující minerály je nutné před vstupy výměníku nainstalovat filtry mechanických nečistot, nebo usazování částic na povrchu teplosměnných desek výměníku zabránit jiným způsobem. Média se musí pohybovat ve výměníku v co největších průtokových množstvích, při malém průtoku tvz. částečném zatížení se může zmenšit turbulence ve výměníku a vzrůstá možnost znečištění (ucpání). Usazování nečistot ve výměníku se projeví poklesem výkonu a nárůstem tlakové ztráty výměníku.



Obr. 3.18 Pájené deskové výměníky [www.globalspec.com]

Výhodou tohoto typu výměníků jsou jejich malé rozměry v poměru k výkonu. Další výhodou a relativně dobrá cena, která vychází z malé technologické náročnosti. V tepelné technice je nejúčinnější svislá poloha. Ostatní montážní by mohli způsobit snížení výkonu. V chladírenské technice, kde jsou využívány jako výparníky nebo kondenzátory, se vyžaduje vždy svislá montážní poloha.



Obr. 3.19 Jednotlivé způsoby zapojení výměníků [www.reflexcz.cz]

Potrubí ve výměníku musí být uloženo tak, aby ani chvění, kroucení, rázy nebo rázy nebo pulzace nebyly přenášeny na výměník.

3.1.3 Spirálový výměník

Řadí se do kategorie deskových výměníků. Média proudí zpravidla v protiproudu ve spirálově zakřivených kanálech přičemž zvyšuje intenzitu tepla a současně snižuje kritickou hodnotu Re přechodu do turbulence. Nevýhodou těchto výměníků je omezení tlaků a možnost netěsností u starších typů. Výhody jsou relativně nízké tlakové ztráty a malý sklon k zanášení. Mají při daném zastavěném objemu větší teplosměnou plochu než výměníky deskové.



Obr. 3.20 Spirálový výměník [www.alfalaval.com] Obr. 3.21 Princip spirálového výměníku [www.alfalaval.com]



Obr. 3.22 Ukázka použití spirálového výměníku [www.g-mar.cz]

3.2 Výměníky regenerační

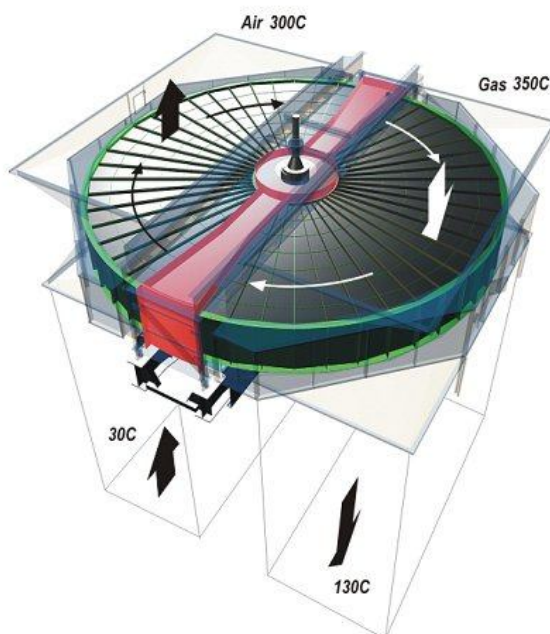
Přenos tepla je uskutečněn prostřednictvím pohyblivé nebo nepohyblivé výplně. Teplá látka předává teplo výplni, která se nahřívá a následně se toto naakumulované teplo předává látce ohřívané.

Materiálem výplně mohou být například žáruvzdorné cihly, kovové plechy, kuličky a jiný materiál. Typickým příkladem regeneračních výměníků jsou ohříváky vzduchu, které jsou stavěny s osou vertikální nebo horizontální.

Horizontální ohřívák má projekční výhody z hlediska polohy ložisek, převodovky a elektromotoru. Jeho nevýhodou je, že vlivem napětí vznikajícího působením ohybového momentu, který působí na čepy a náboj ohříváku, může dojít k únavě materiálu. Dále je konstrukce dražší a hmotnější než u ohříváků vertikálních. Nejrozšířenější aplikací tohoto typu výměníků v energetice je tzv. Ljungströmův ohřívák (spaliny-vzduch).

3.2.1 Ljungströmův ohřívák

Ljungströmův ohřívák se skládá z rotoru, jenž je vyplněn plechy uloženými v koších. Rotor tuhé svařované konstrukce kruhového tvaru je vestavěn do uzavřeného prostoru, který je rozdělen a současně utěsněn sektorovými deskami na spalínovou a vzduchovou část. Nosnou částí ohříváku je skříň opatřená přechodovými kusy sloužícími k připojení spalínových a vzduchových potrubí. Ohříváky typu Ljungström jsou stavěny do průměru rotoru 20m s počtem otáček 2-6/min a výkonem poháněného elektromotoru do 40 kW. Výška vrstvy studeného konce je zvolena tak, aby teplota kovu dalších vrstev nebyla vyšší než rosný bod H_2SO_4 . Hlavními požadavky na výhřevnou výplň jsou: dobrý přenos tepla, nízké tlakové ztráty, snadné čištění za provozu a odolnost proti korozi. Materiál náplně je volen dle obsahu síry v palivu. Pro nízký obsah síry je to uhlíkatá ocel pro palivo s vyšším obsahem síry je ocel nízkolegovaná nebo profily chráněné proti korozi kyselinou smaltem. Síla plechu je bývá obvykle volena 0,6-1,2 mm. Výhody ohříváku Ljungström jsou například možnost čištění za provozu, které je zajištěno výkyvnými nebo stabilními ofukovači. Možnost volby nižších teplot. Dále snadná výměna výhřevných ploch především nejvíce korozemi ohrožované vrstvy. Hlavní nevýhodou těchto ohříváků je menší těsnost a určité prolínání pracovních látek, což omezuje jejich použití. Regenerativní ohřívák spaliny – vzduch je technicky náročné zařízení.



Obr. 3.23 Ljungströmův ohřívák [www.howden.com]

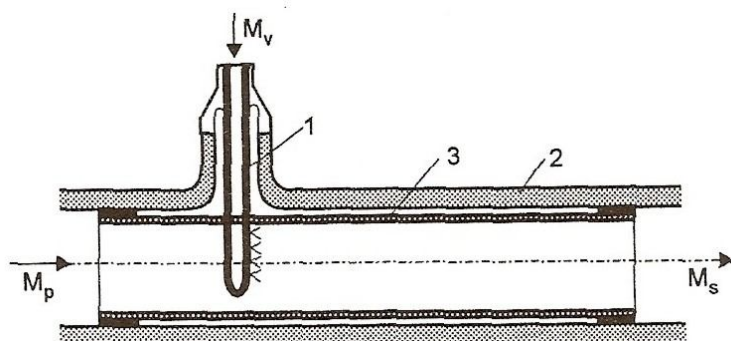
3.3 Směšovací výměníky

Sdílení tepla probíhá přímým stykem obou pracovních látek. V porovnání s ostatními typy výměníků neexistuje teplosměná plocha. V teplárenství se nejčastěji používá v těchto aplikacích.

- a) vstřík vody do páry
- b) ohřev napájecí vody

3.3.1 Vstříkovací chladič páry

Využívá pro vstřík napájecí vody do páry k regulaci teploty přehřáté páry u kotle, vstříkovaná voda je vždy než pára. Vypaření kapiček trvá určitou dobu a chladič musí mít proto dlouhou plechovou vložkou. Oproti chladičům rekuperačním jednoduchá konstrukce a rychlá odezva na teplotu přehřáté páry.



Obr. 3.24 Vstříkovací chladič páry [1]

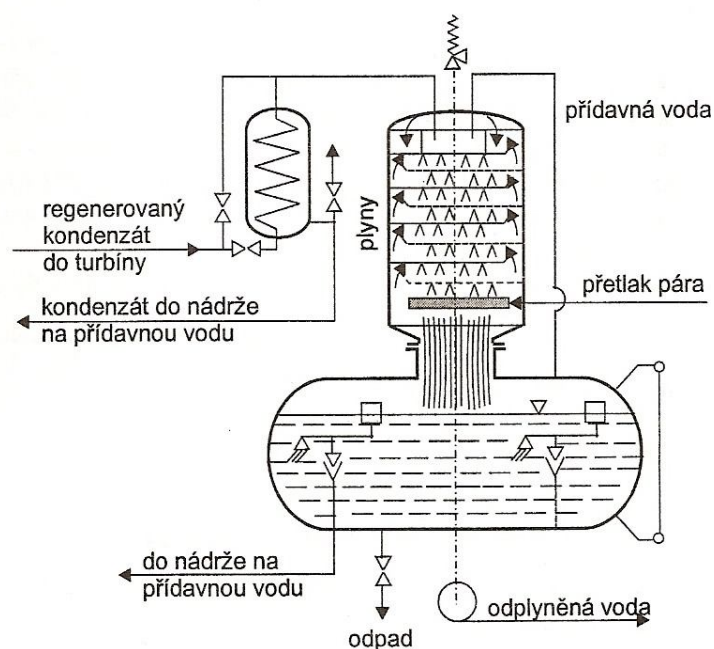
1 - trubka s rostřikovacími otvory, 2 - základní parní potrubí, 3 - vnitřní vestavba

3.3.2 Nízkotlaký odplynovák

Jedná se o mísení vody a nízkotlaké páry, protože dochází ke změně chemického složení nazývají se výměníky odplynováky. Tepelné odplynění se uskutečňuje většinou při teplotě varu a 105°C při mírném přetlaku. Ohřevem se vyloučí všechny plyny obsažené v napájecí vodě a kontinuálně za provozu jsou z odplynováku vypouštěny. Odplynění se provádí, aby se zapříčinilo korozi jež způsobují plyny ze strany vody (dusík, vodík a oxid uhličitý). U odplynovače je nutné zajistit velkou stykovou plochu mezi vodou a parou nejčastěji tvz. sprchovým provedením. Podle způsobu styku ohřívání vody s párou se odplynováky dělí na kaskádové, sprchové a atomizační (topná pára rozprašuje ohřívanou vodu).



Obr. 3.25 Odplyňovák [spthermal.homestead.com]

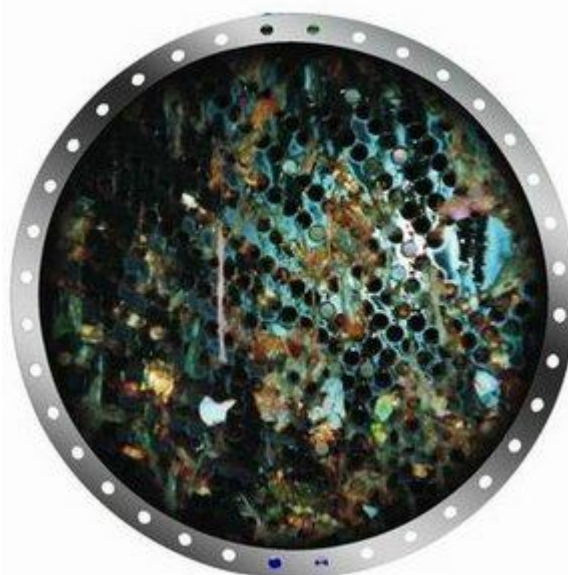


Obr. 3.26 Schéma nízkotlakého odplynováku [1]

4.0 Čištění a provoz výměníků

Základním problémem jsou netěsnosti pracovních látek, hlavními příčinami těchto netěsností jsou tyto:

- zanášení výhřevných ploch
- koroze výhřevných ploch
- obrazy výhřevných ploch



Obr. 4.1 Znečištění tepelný výměník parní elektrárny [www.wikipedia.org]

4.1 Hlavní příčiny způsobující poruchy výměníků

Zanášení výhřevných ploch

Je usazování různých materiálů – solí, korozních produktů a pevných látek na výhřevnou plochu výměníku. Jejich vlivem se silně zhoršuje prostup tepla a tepelný výkon. Tato usazenina může nabýt takových rozměrů, že působí jako izolant a přenos tepla je natolik ztížen, že může dojít k poruchám zařízení.

Zanášení lze ovlivnit:

- Úpravou vody (snížení koncentrace solí)
- Mechanickým čištěním trubek chemikáliemi



Obr. 4.2 Trubka kondenzátoru se zbytky organických usazenin (v řezu) [www.wikipedia.org]

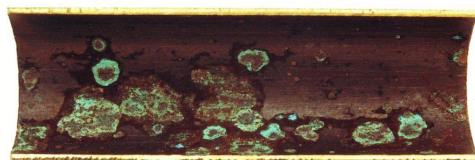


Obr. 4.3 Příklad znečištění u deskového výměníku tepla [www.tempmaker.com]

Koroze výhřevných ploch

U teplé užitkové vody. Jsou způsobeny kyslíčkem, případně oxidem uhličitým. Napadení je většinou důlkové. Intenzita napadení se zvyšuje přítomností inkrustací a sedimentů. Proces koroze lze výrazně zpomalit odplyněním případně vhodným dávkováním inhibičních látek. Nebo také pozinkováním materiálu výhřevných ploch, speciálními povrchovými povlaky nebo použitím legovaných ocelí případně mědi.

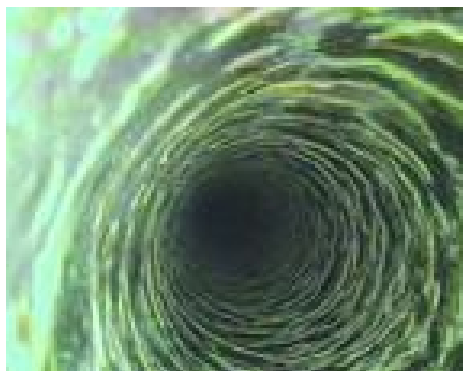
Ze strany spalin u výměníků kotlových závisí rozsah napadení na složení spalovaného paliva a provozní teplotě. Prostředky proti nízkoteplotním korozím jsou především optimalizace spalovacího režimu, udržení teploty povrchu pod bodem varu, používání odolných materiálů vůči korozi.



Obr. 4.4 Mosazná trubka narušená korozí (v řezu) [www.wikipedia.org]

Abraze výhřevných ploch

Úbytek materiálů jež způsobují pevné částice ve spalinách. Na straně spalin dochází k úbytku materiálů a v konečné fázi k netěsnostem. Prevence je možná snížením rychlosti spalin, konstrukčními úpravami (pasivní trubky).



Obr. 4.5 Typický příklad abraze v trubce [www.hydrojet.com.au]

Dále dochází i k jiným příčinám netěsností jako jsou například:

- vady svarů a materiálu
- kavitační poškození
- únavové porušení trubek v důsledku vibrací



Obr. 4.6 Deskový výměník poškozený v důsledku znečištění [www.euroclean.cz]

4.2 Čištění výměníků

Proces čištění charakterizuje činnost, kdy je pomocí nějakého zařízení zajišťováno čištění údržba výměníků. Čištění výměníku se provádí tehdy, jestliže dochází k zanášení výměníku různými usazeninami, což vede k poklesu tepelného výkonu, růstu tlakové ztráty a v krajním případě k ucpaní trubky případně propálení stěn kotle nebo potrubí. V potravinářském a farmaceutickém průmyslu se provádí čištění například po instalaci trubky nebo změně po změně produktu ve výměníku.

- chemické čištění
- mechanické čištění
- tepelné čištění
- zvláštní druhy

4.2.1 Chemické čištění

Chemickým čištěním rozumíme čištění, kde je použita nějaká kapalina nebo chemikálie odstraňující znečištění. Tepelné výměníky se chemicky čistí proplachováním pomocí chemického prostředku. Druh použité chemikálie závisí na typu aplikace a materiálu výměníku. Nejsou-li komerční prostředky dosažitelné lze s ohledem na konstrukci výměníku použít nejlevnější prostředky tj. louh sodný nebo kyselinu dusičnou. Pro čištění výměníků pro přípravu TUV je výhodné používat kyselinu citrónovou, která je vhodná pro hygienickou nezávadnost a narušuje většinu běžných usazenin.

Proplachovat nutno vždy opačným směrem, než je pohyb pracovního média. Tato metoda čištění vyžaduje odstavení výměníku z provozu. Proplachování může být prováděno i bez odpojení výměníku ze systému, to však vyžaduje zvláštní přípoje a dodatečné armatury. Nevýhodou tohoto typu čištění je, že na velké aplikace jsou potřeba velká množství čistící tekutiny. Dalším problém nastává v potravinářském průmyslu, kde musí být zvolena vhodná čistící kapalina z hlediska toxicity. Doba čištění je závislá na druhu usazeniny. Obecně vzato proces chemického čištění je použitelný pro každý průměr, nicméně praktická hranice využití závisí na objemu z objemu potrubí.



Obr. 4.7 Chemické čištění výměníku [www.nuovasaimar.it]



Obr. 4.8 U-trubkový výměník před a po čištění [www.nuovasaimar.it]

4.2.2 Mechanické čištění

Při mechanickém systému čištění je čistící těleso protažené skrz trubku, aby se odstranila usazenina ze stěny trubek. V nejjednodušším případě jsou použity kartáče, které jsou protahovány trubkou. Ve velkém měřítku se tato technologie používá v průmyslovém sektoru.

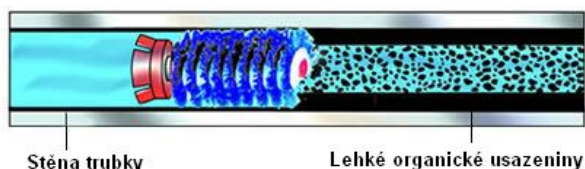
- Off-line proces (výměník je odpojen ze systému)
- On-line proces (výměník zůstává zapojen v systému) – Metoda CQM

Off- line proces se vyznačuje skutečností, že k tomu, aby byl výměník vyčištěn musí být odstaven z provozu, aby se mohla použít čistící tělesa a vykonat čistící procedura. U off-line procesu lze použít aktivní nebo pasivní čistící tělesa.



Obr. 4.9 Čištění svazku trubek výměníku tlakovou vodou [www.bps-waterjetting.co.uk]

Pasivní čistící tělesa mohou být ve formě kartáčů, dále také jako škrabky, čištění je prováděno pomocí tlakového vzduchu, vody nebo jinými prostředky. Kartáče se štětinami z plastu nebo ocelové škrabky se používají především u menších průměrů trubek. Volba čistícího tělesa je závislá na charakteru usazenin. Tato metoda je použitelná pro výměníky s průměry potrubí od 5 mm.



Obr. 4.10 Princip čištění trubky (kartáč se štětinami) [www.concosystems.com]

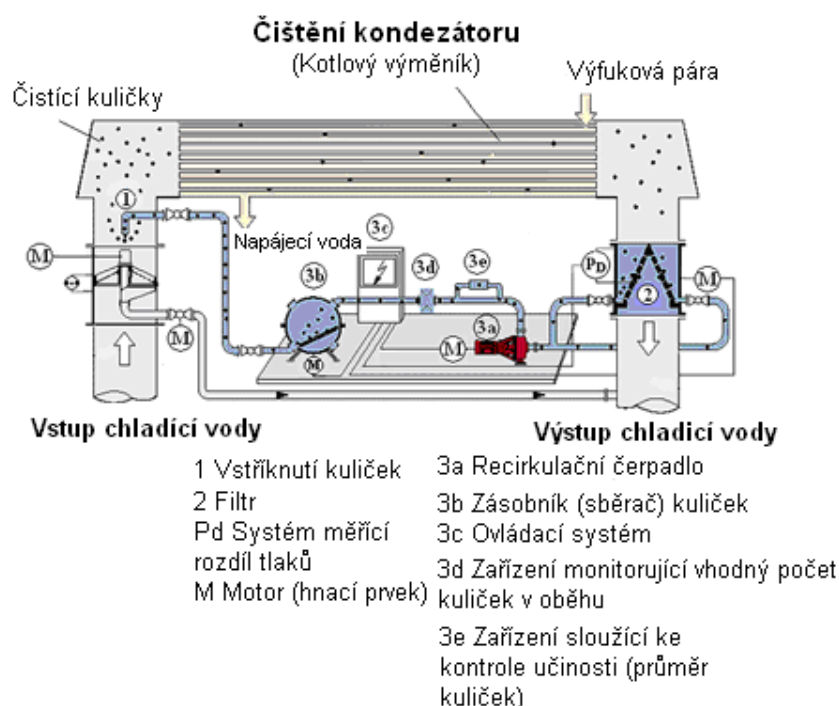


Obr. 4.11 Ocelová čistící tělesa, kartáče se štětinami [www.concosystems.com]

Aktivní čistící tělesa bývají obvykle dálkově řízení roboti. Lze jimi pohybovat v potrubí a provádět jeho čištění. Společně s čistícím tělesem jsou potrubím protahovány nejen kabely pro napájení a komunikaci, ale také hadice pro čistící kapalinu a měřicí zařízení nebo kamery, z kterých je přenášén obraz a naměřené údaje na monitor. Takový typ zařízení je obvykle používán od průměru 300 mm, maximální průměr bývá okolo 2 m, pro větší průměry by byla jistě méně nákladná inspekce potrubí.

Čištění výměníků metodou CQM

Čištění se provádí za provozu výměníku plastovými kuličkami s povrchovými hroty, které mají stejný průměr jako mají trubky výměníku. Kuličky jsou v předem nastavených časových intervalech vpuštěny do okruhu výměníku a protaženy trubkami, čímž strhnou všechny nově vzniklé usazeniny. Touto metodou čištění jsou eliminovány složitosti s chemickým čištěním výměníku.



Obr. 4.12 Schéma čištění metodou CQM [www.wikipedia.org]



Obr. 4.13 Čištění metodou CQM [www.dostrading.eu]

4.2.3 Tepelné čištění

Off-line proces. Při tepelném čištění jsou usazeniny vysoušeny teplem, dochází jejich zkrěhnutí a následně se odlupují. Usazeniny jsou poté odstraněny např. promývací kapalinou. V závislosti na požadované teplotě může být zdrojem tepla paralelní trubka nebo lze využít indukčního ohřevu. Příležitostně se tento proces využívá pro sterilizaci trubek ve farmaceutickém nebo potravinářském průmyslu.

4.2.4 Speciální typy čištění

Zvláštní druhy čištění trubek jsou většinou částečně v experimentálním stupni vývoje a nejsou využívány v takové míře jako druhy čištění dříve zmiňované. Je to například:

- využití vodního rázu k odstranění usazenin
- využití magnetického pole, aby nedocházelo v trubce k vápenatění
- použití vibrací k čištění dochází díky změnám povrchového napětí

4.2.5 Ofukovače a ostříkovače

Vodní ostříkovač je zařízení sloužící k čištění teplosměnných ploch topenišť elektrárenských kotlů za provozu. A k odstraňování struskových nálepů dochází tepelným šokem při postřikání strusky studenou vodou.

Ofukovač je zařízení, který se za provozu odstraňuje nánosy z popelovin z povrchu teplosměnných ploch částí parních kotlů. K odstranění nánosů popílku, škváry se dosáhne působením kinetické energie proudu ofukovacího média (tlaková pára nebo vzduch).

5.0 Experimentální jednotka Biofluid 100

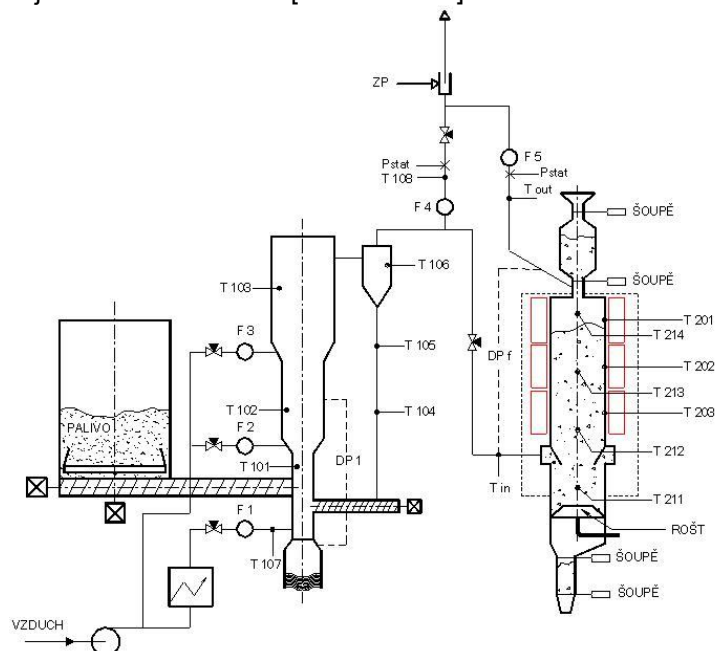
Zařízení slouží k výzkumu zplyňování biopaliv a odpadů. Jedná se o fluidní atmosférický zplyňovací reaktor se stacionární fluidní vrstvou. Zařízení je schopné pracovat ve zplyňovacím i spalovacím režimu. Zplyňování pomocí vzduchu je přeměna organické hmoty v nízkovýhřevný plyn. Najetí fluidního zplyňovacího generátoru do ustáleného stavu se provádí pomocí spalovacího režimu. Součástí výzkumu na tomto zařízení je také čištění plynu vzniklého při zplyňování. Čištění plynu probíhá v horkém katalytickém filtru.



Parametry reaktoru

Výkon (v produkovaném plynu)	100 kWt
Příkon (v palivu)	150 kWt
Spotřeba paliva	max. 40kg/h
Průtok vzduchu	max. 50 m ³ /h

Obr.5.1 Experimentální jednotka Biofluid 100 [www.vutbr.cz]



Obr. 5.2 Schéma Experimentálního zařízení Biofluid 100 [www.vutbr.cz]

6.0 Výpočet výměníku

6.1 Zadání

Při volbě výměníku tepla pro ohřev primárního vzduchu na standu BIOFLUID 100, jsem vycházel z poznatků o vlastnostech výstupního plynu. Přičemž plyn bude proudit v trubkovém prostoru z důvodu snadnějšího čištění a ohříváný vzduch v prostoru mezitrubkovém. Vzhledem k celkové konstrukci zařízení, volím tedy trubkový, protiproudý, bezpřepážkový výměník s přímými trubkami.

Plyn (trubkový prostor):

$$m_1^{V0} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$c_{p1} = 1,690 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_1 = 1,072 \text{ kg/m}^3$$

$$t_{11} = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{12} = ?$$

Vzduch (mezitrubkový prostor):

$$m_2^{V0} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$c_{p2V} = 1,003 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{2V} = 1,205 \text{ kg/m}^3$$

$$t_{21} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{22} = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Označení význam a jednotky jednotlivých viz.seznam veličin str. 46

$$c_{p1} = 1,690 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \quad [7]$$

Množství a složení výchozího plynu:

	m^3/h	kg/h
H ₂	5,04	0,454
CO	6,73	8,412
CO ₂	3,25	6,435
CH ₄	0,92	0,660
C ₂ H ₄	0	0
N ₂	11,06	13,82
H ₂ O	3,00	2,40
Σ	30,0	32,18

Tab. 1 - množství a složení výchozího plynu [7]

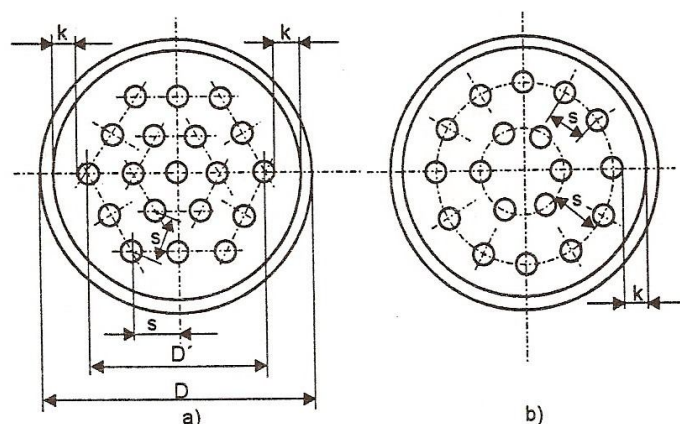
Pozn.: Obsah etylénu je v dalších výpočtech zanedbán

Přepočet (kg/h, kg/s):

$$m_1^h = m_1^{V0} \cdot \rho_1 = 30 \cdot 1,072 = 32,16 \text{ kg/h} = 0,00893 \text{ kg/s}$$

$$m_2^h = m_2^{V0} \cdot \rho_{2V} = 20 \cdot 1,205 = 24,1 \text{ kg/h} = 0,00669 \text{ kg/s}$$

6.2 Výpočet geometrických rozměrů trubkového výměníku



Obr.6.1 Uspořádání trubek ve výměníku [1]
a) uspořádání trojúhelníkové b) uspořádání po kružnici

Počet trubek

Hustota plynu v trubce $\rho_1 = 1,072 \text{ kg/m}^3$

Vnitřní průměr volím trubky $d_1 = 18 \text{ mm} = 0,018 \text{ m}$

Vnější průměr volím trubky $d_e = 21 \text{ mm} = 0,021 \text{ m}$

Předběžnou délku trubek volím $l_t = 2 \text{ m}$

$$n = \frac{4 \cdot m_1^h}{\pi \cdot d_1^2 \cdot u_1 \cdot \rho_1} \quad [1]$$

po úpravě

$$n = \frac{4 \cdot m_1^v}{\pi \cdot d_1^2 \cdot u_1} = \frac{4 \cdot 89,06}{\pi \cdot 0,018^2 \cdot 5,2} \cdot \frac{1}{3600} = 19 \text{ trubek}$$

Rozteč mezi trubkami

s obvykle volí 1,3 až 1,5 d_e

$$s = 1,5 \cdot d_e = 1,5 \cdot 18 = 27 \text{ mm} = 0,027 \text{ m} \quad [1]$$

Vůle mezi krajními trubkami a pláštěm

Z konstrukčních důvodů od 6mm výše volím $k=12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$ [1]

Poměrný průměr trubkovnice pro uspořádání trubek v plášťovém výměníku D'/s

D'/s	n_1	n_2	D'/s	n_1	n_2
2	7	7	22	439	410
4	19	19	24	517	485
6	37	37	26	613	566
8	61	62	28	721	653
10	91	93	30	823	747
12	127	130	32	931	847
14	187	173	34	1045	953
16	241	223	36	1165	1066
18	301	279	38	1306	1185
20	367	341	40	1459	1310

Tab.2 - poměrný průměr trubkovnice D'/s [1]

n_1 – celkový počet trubek rozmístěných na trubkovnici s upořádáním trojúhelníkovým (Obr.6.1 a)

n_2 – celkový počet trubek rozmístěných na trubkovnici s upořádáním po kružnici (Obr.6.1 b)

Volím uspořádání po kružnici (Obr.6.1 b)

$$D'/s = 4 \Rightarrow D'/27 = 4 \Rightarrow D' = 108 \text{ mm} = 0,108 \text{ m} \quad [1]$$

Vnitřní průměr pláště výměníku

$$D_i = D' + d_e + 2k = 108 + 18 + 24 = 150 \text{ mm} = 0,150 \text{ m} \quad [1]$$

6.3 Tepelný výpočet výměníku

Rovnice (výkonových) tepelných bilancí

Při ustáleném stavu platí, že tepelný příkon Q_1 přiváděný teplejší látkou se rovná tepelnému výkonu Q_2 přenesenému do chladnější pracovní látky plus ztrátám do okolí Q_z .

$$Q_1 = Q_2 + Q_z \quad [2]$$

Vzhledem k tomu, že ztráty do okolí Q_z u výměníků většinou nepřekročí 5% zanedbávají se.

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad [2]$$

Výpočet tepelného výkonu výměníku

$$Q = Q_2 = m_2^h \cdot c_{p2} (t_{22} - t_{21}) = 0,00669 \cdot 1,003 \cdot (300 - 20) = 1,88 \text{ kW} \quad [2]$$

Výpočet výstupní teploty plynu t_{12} z rovnice tepelných bilancí:

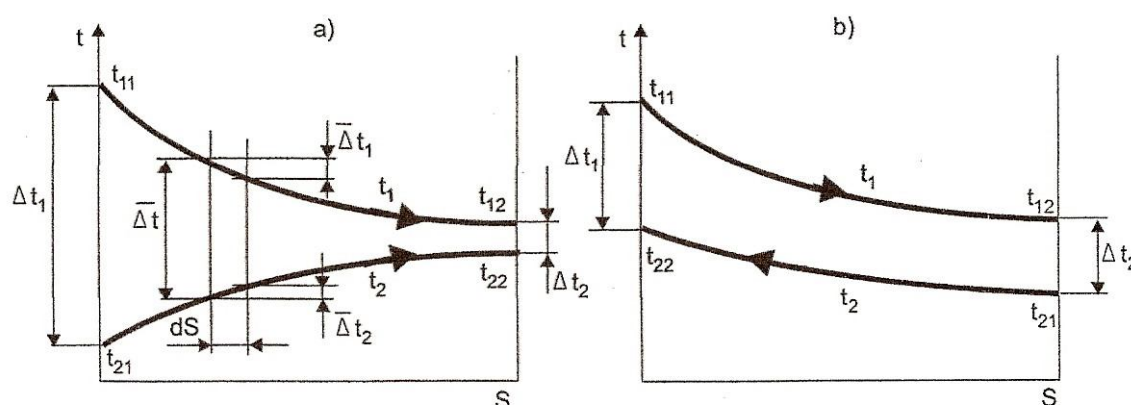
$$Q_1 = Q_2 = Q \quad [2]$$

$$Q = m_1^h \cdot c_{p1} (t_{11} - t_{12}) = m_2^h \cdot c_{p2} (t_{22} - t_{21})$$

$$\begin{aligned}
 m_1^h \cdot c_{p1}(t_{11} - t_{12}) &= m_2^h \cdot c_{p2}(t_{22} - t_{21}) \Rightarrow \\
 t_{12} &= \frac{m_1^h \cdot c_{p1} \cdot t_{11} - m_2^h \cdot c_{p2V} \cdot (t_{22} - t_{21})}{c_{p1} \cdot m_1^h} = \\
 &= \frac{0,00893 \cdot 1,690 \cdot 600 - 0,00669 \cdot 1,003 \cdot (300 - 20)}{0,00893 \cdot 1,690} = 475,5 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

6.3.1 Střední logaritmický teplotní spád

Při průtoku pracovní látky výměníkem dochází ke změně její teploty, křivka tohoto průběhu je křivkou logaritmickou.



Obr.6.2 Teplotní poměry při výměně tepla [1]
a) souprout , b) protiproud

Rozdíl mezi středními hodnotami lze definovat jako střední logaritmický rozdíl.

$$\Delta t_a = t_{11} - t_{22} = 600 - 300 = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_b = t_{12} - t_{21} = 475,5 - 20 = 455,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

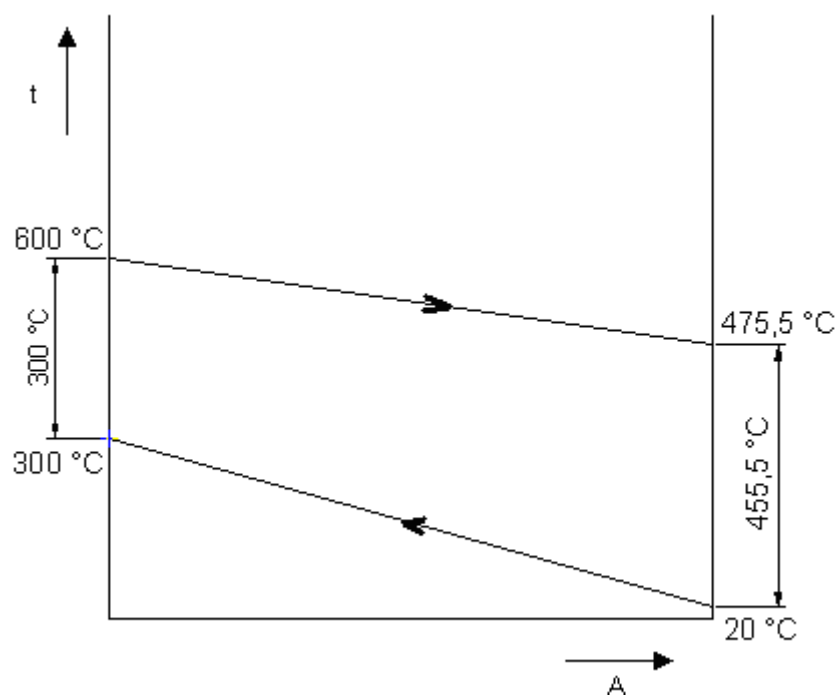
[2]

$$m_1^h \cdot c_{p1} = 0,0150917$$

$$m_2^h \cdot c_{p2} = 0,00671007$$

$$\Rightarrow m_1^h \cdot c_{p1} > m_2^h \cdot c_{p2V} \Rightarrow \begin{aligned} \Delta t_a &= \Delta t_{\min} \\ \Delta t_b &= \Delta t_{\max} \end{aligned}$$

Z výše uvedeného vyplývá, že se jedná o protiproudé uspořádání výměníku.



Obr. 6.3 Průběh středního logaritmického teplotního spádu
A - výhřevná plocha, t – čas

$$\Delta \bar{t}_{\ln} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}} = \frac{455,5 - 300}{\ln \frac{455,5}{300}} = 372,4 \text{ °C} \quad [2]$$

6.3.2 Prostup tepla

6.3.2.1 Součinitel přestupu tepla v trubkovém prostoru

Střední teplota plynu

$$t_1 = \frac{t_{11} + t_{12}}{2} = \frac{600 + 475,5}{2} = 537,75 \text{ °C} \quad [2]$$

Objemový tok plynu ve výměníku vztahovaný ke střední teplotě

$$m_1^v = m_1^{v0} \cdot \frac{t_1 + 273,15}{273,15} = 30 \cdot \frac{537,75 + 273,15}{273,15} = 89,06 \text{ m}^3/\text{h}$$

Celkový průtočný průřez

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,018^2}{4} \cdot 19 = 0,004835 \text{ m}^2 \quad [2]$$

Rychlost proudění pracovního média v trubkách

$$u_1 = \frac{m_1^h}{\rho_1 \cdot S_1} \quad [2]$$

Po úpravě pro reálné množství plynu ve výměníku

$$u_1 = \frac{m_1^v}{S_1} = \frac{m_1^v}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot n} \cdot \frac{1}{3600} = \frac{89,06}{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4} \cdot 19} \cdot \frac{1}{3600} = 5,2 \text{ m/s}$$

Výpočet Re_1

$$Re_1 = \frac{u_1 \cdot d_1}{\nu_1} = \frac{5,2 \cdot 0,018}{222,26 \cdot 10^{-6}} = 421,1 < 2320 \quad [2]$$

Z Re vyplývá, že se jedná o laminární oblast proudění
Kinematická viskozita plynu $\nu_1 = 222,26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [7]

Dynamická viskozita plynu

$$\eta_1 = \nu_1 \cdot \rho_1 = 222,26 \cdot 10^{-6} \cdot 1,072 = 0,000238 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad [2]$$

Výpočet Pr_1

$$Pr_1 = \frac{c_{p1} \cdot \eta_1}{\lambda_1} = \frac{1,690 \cdot 10^3 \cdot 0,000238}{122,56 \cdot 10^{-3}} = 3,282 \quad [2]$$

Součinitel tepelné vodivosti plynu $\lambda_1 = 122,56 \cdot 10^{-3} \text{ W/mK}$ [7]

Výpočet Nu_1

$$Nu_1 = \frac{0,19 \cdot (Re \cdot Pr \cdot y_1)^{0,8}}{1 + 1,117 \cdot (Re \cdot Pr \cdot y_1)^{0,467}} + 3,65 \cdot y_2 \quad [2]$$

$$y_1 = \frac{d_1}{l_t} = \frac{0,018}{2} = 0,009 ; y_2 = 1$$

Korekční faktor zohledňující změnu látkových vlastností kapaliny v mezní vrstvě pro plyny $y_2 = 1$ [2]

$$Nu_1 = \frac{0,19 \cdot (421,1 \cdot 3,282 \cdot 0,009)^{0,8}}{1 + 1,117 \cdot (421,1 \cdot 3,282 \cdot 0,009)^{0,467}} + 3,65 \cdot 1 = 4,685$$

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 \cdot d_1}{\lambda_1} \Rightarrow \alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_1} = \frac{4,685 \cdot 122,56 \cdot 10^{-3}}{0,018} = 31,89 \text{ W/m}^2\text{K} \quad [2]$$

6.3.2.2 Součinitel přestupu tepla v mezitrubkovém prostoru

Bezpřepážkový výměník tudíž je využito vztahů jako pro trubkový prostor. Bezpřepážkový výměník je vhodné použít v případě plyných pracovních látek v mezitrubkovém prostoru.

Střední teplota vzduchu

$$t_2 = \frac{t_{21} + t_{22}}{2} = \frac{300 + 20}{2} = 160 \text{ } ^\circ\text{C} \quad [2]$$

Objemový tok vzduchu ve výměníku vztažený ke střední teplotě

$$m_2^v = m_2^{v0} \cdot \frac{t_2 + 273,15}{273,15} = 20 \cdot \frac{160 + 273,15}{273,15} = 31,72 \text{ m}^3/\text{h}$$

Celkový průtočný průřez

$$S_2 = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n = \frac{\pi \cdot 0,15^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,021^2}{4} \cdot 19 = 0,011 \text{ m}^2 \quad [2]$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,011}{\pi}} = 0,118 \text{ m}$$

Rychlost proudění pracovního média v mezitrubkovém prostoru

$$u_2 = \frac{m_2^h}{\rho_2 \cdot S_2} \quad [2]$$

Po úpravě pro reálné množství vzduchu ve výměníku

$$u_2 = \frac{m_2^v}{\left(\frac{\pi \cdot D_i^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n \right)} = \frac{31,72}{\left(\frac{\pi \cdot 0,15^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,021^2}{4} \cdot 19 \right)} \cdot \frac{1}{3600} = 0,8 \text{ m/s}$$

Výpočet Re_2

$$Re_2 = \frac{u_2 \cdot d_2}{\nu_2} = \frac{0,8 \cdot 0,118}{29,98 \cdot 10^{-6}} = 3148,77 > 2300 \quad [2]$$

Z Re vyplývá, že se jedná o turbulentní oblast proudění
Kinematická viskozita vzduchu při 160°C $\nu_2 = 29,98 \text{ m}^2/\text{s}$ [3]

Výpočet Pr_2

$$Pr_2 = \frac{c_{p2} \cdot \eta_2}{\lambda_2} = \frac{1,030 \cdot 10^3 \cdot 24,1 \cdot 10^{-6}}{3,44 \cdot 10^{-2}} = 0,721 \quad [2]$$

Součinitel tepelné vodivosti vzduchu při 160°C $\lambda_2 = 3,44 \cdot 10^{-2}$ W/mK [3]

Dynamická viskozita vzduchu při 160°C $\eta_2 = 24,1 \cdot 10^{-6}$ Pa·s [3]

Výpočet Nu_2

$$Nu_2 = \frac{x_5 \cdot (Re_2 - 1000) \cdot Pr_2}{1 + 12,7 \sqrt{x_5} \cdot \left(Pr_2^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \cdot \left(1 + y_1^{\frac{2}{3}} \right) \cdot y_2$$

$$x_5 = \frac{1}{8} \cdot (1,82 \cdot \log Re_2 - 1,64)^{-2} \quad y_1 = \frac{d_2}{l_t} = \frac{0,118}{2} = 0,059 \quad [2]$$

$$x_5 = \frac{1}{8} \cdot (1,82 \cdot \log 3148,77 - 1,64)^{-2}$$

$$x_5 = 0,0056$$

$$y_2 = 1$$

Korekční faktor zohledňující změnu látkových vlastností kapaliny v mezní vrstvě pro plyny $y_2 = 1$ [2]

$$Nu_2 = \frac{0,0056 \cdot (3148,77 - 1000) \cdot 0,721}{1 + 12,7 \sqrt{0,0056} \cdot \left(0,721^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \cdot \left(1 + 0,059^{\frac{2}{3}} \right) \cdot 1 = 12,28$$

$$Nu_2 = \frac{\alpha_2 \cdot d_2}{\lambda_2} \Rightarrow \alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_2} = \frac{12,28 \cdot 3,44 \cdot 10^{-2}}{0,118} = 3,58 \text{ W / m}^2\text{K} \quad [2]$$

6.3.2.3 Součinitel prostupu tepla

Součinitel prostupu tepla pro válcovou stěnu

$$k_L = \frac{1}{\frac{d_e}{d_1} \cdot \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_e}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_e}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$= \frac{1}{\frac{0,021}{0,018} \cdot \frac{1}{31,89} + \frac{0,021}{2 \cdot 30} \cdot \ln \frac{0,021}{0,018} + \frac{1}{3,58}}$$

$$= 3,16 \text{ W / m}^2\text{K} \quad [2]$$

Součinitel tepelné vodivosti nerez oceli $\lambda = 30$ W/mK [1]

6.3.3 Výpočet výhřevné plochy

$$S = \frac{Q}{k_L \cdot \Delta \bar{t}_{in}} = \frac{1,88 \cdot 10^3}{3,16 \cdot 372,4} = 1,598 \text{ m}^2 \quad [1]$$

6.3.4 Úprava rozměrů konečný návrh Úprava délky trubek

$$l_t = \frac{S}{\pi \cdot d_e \cdot n} = \frac{1,598}{\pi \cdot 0,021 \cdot 19} = 1,28 = 1,3 \text{ m} \quad [2]$$

Skutečná výhřevná plocha po úpravě rozměrů

$$S_{skut} = l_t \cdot \pi \cdot d_e \cdot n = 1,3 \cdot 0,021 \cdot 19 \cdot \pi = 1,63 \text{ m}^2$$

Skutečně předané teplo

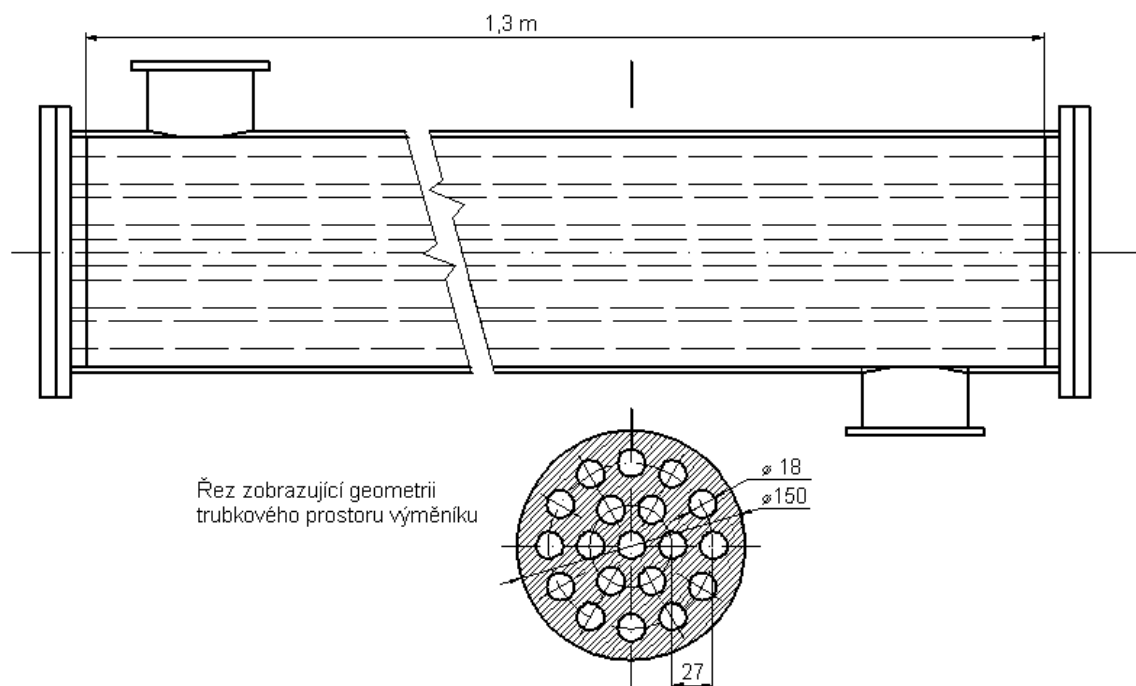
$$Q_{skut} = k_L \cdot S_{skut} \cdot \Delta \bar{t}_{in} = 3,16 \cdot 1,63 \cdot 372,4 = 1918,16 \text{ W} \quad [8]$$

Kontrola rozdílu skutečného a předaného tepla

$$y = 100 - 100 \cdot \frac{Q}{Q_{skut}} < \pm 5\% \quad [8]$$

$$y = 100 - 100 \cdot \frac{1880}{1918} = 2\% < \pm 5\%$$

Zvýše uvedeného vztahu vyplývá, že není nutný přepočet výměníku.



Obr. 6.4 Schéma výměníku a geometrie mezitrubkového prostoru

7.0 Závěr

V této práci byla zpracována rešerše týkající se výměníku tepla jejich konstrukce, provozu a čištění. V další části práce byl dle literatury uvedené v seznamu navržen výměník pro ohřev primárního vzduchu odpadním teplem generovaným na standu Biofluid 100.

Tento výměník je navržen jako bezpřepážkový výměník se svazkem 19 přímých trubek z nerez oceli o průměru (18x1,5mm) a o délce 1,3m. Plášť výměníku ocelová bezešvá trubka o průměru (150x4,5mm). Z vnějšku je výměník zaizolován, aby nedocházelo k úniku tepla. (Obr.6.4)

Seznam použité literatury

- [1] Spalovací zařízení a výměníky tepla, Doc.Ing. Ladislav Ochmana CSc, Brno 2004
- [2] Tepelné pochody - Výpočet výměníku tepla, Ing. Petr Stehlík, Prof.Ing. Josef Kohoutek CSc., Ing. Jan Němčanský, Brno 1991
- [3] Technický průvodce - Větrání a klimatizace, Prof. Ing. Jaroslav Chyský CSc., Prof. Ing. Karel Hemzal CSc. a kolektiv, Praha 1993
- [5] Základy přenosu tepla a hmoty I (přenos hybnosti a tepla – výměníky tepla) - Dokument pdf., Tomáš Vít, 1998
- [6] Základy přenosu tepla a hmoty II (Konvektivní přenos tepla) – Dokument pdf., Tomáš Vít, 1998
- [7] Firemní dokumenty - Ateko a.s. Hradec králové - Výpočet a návrh zařízení na chlazení energoplynu za vysokoteplotním filtrem
- [8] Návrh výměníku – Učební text, Ing. Marek Baláš

Informace v síti INTERNET

- | | |
|--|---|
| - Alfa Laval | http://www.alfalaval.com |
| - BCB Plzeň, s.r.o | http://www.bcb-plzen.eu |
| - Conco Systém, Inc. | http://www.concosystems.com |
| - G - MAR PLUS, s.r.o | http://www.g-mar.cz |
| - NUOVA SAIMAR, S.r.l. | http://www.nuovasaimar.it |
| - PBS Třebíč, a.s. | http://www.pbstre.cz |
| - PROFITALL, s r.o. | http://www.profitall.cz |
| - Sato, s.r.o | http://www.sato-praha.cz |
| - ŽEBROVANÉ TRUBKY ŽABA s.r.o. | http://www.zebrovanetrubky.cz |
| - Wikipedia veřejná internetová encyklopedie | http://www.wikipedia.org/ |

Seznam použitých veličin

Označení	Jednotka	Význam
C_{p1}	kJ/kgK	střední měrná tepelná kapacita plynu
C_{p2}	kJ/kgK	střední měrná tepelná kapacita vzduchu při střední teplotě 160°C
C_{p2v}	kJ/kgK	střední měrná tepelná kapacita vzduchu na vstupu 20°C
D'	m	průměr sloužící k určení poměrného průměru
d_1	m	vnitřní průměr trubky
d_2	m	průměr vyplývající z celkového průtočného průřezu mezitrubkového prostoru
d_e	m	vnější průměr trubky
Di	m	vnitřní průměr pláště výměníku do trubky
k_L	$\text{W/m}^2\text{K}$	součinitel prostupu tepla válcovou stěnou
l_t	m	délka trubek
m_1^h	kg/s	hmotový tok plynu
m_2^h	kg/s	hmotový tok vzduchu
m_1^{v0}	m^3/h	objemový tok plynu na vstupu
m_2^{v0}	m^3/h	objemový tok vzduchu na vstupu
m_1^v	m^3/h	objemový tok plynu vztažený k střední teplotě
m_2^v	m^3/h	objemový tok vzduchu vztažený k střední teplotě
n	1	počet trubek ve svazku
Pr_1	1	Prandtlovo číslo v trubkovém prostoru
Pr_2	1	Prandtlovo číslo v mezitrubkovém prostoru průřezu
Q	kW	tepelný výkon
Q_1	kW	tepelný příkon plynu
Q_2	kW	tepelný výkon vzduchu
Q_{skut}	kW	skutečný tepelný výkon
Q_z	kW	ztráty do okolí
Re_1	1	Reynoldsovo číslo v trubkovém prostoru
Re_2	1	Reynoldsovo číslo v mezitrubkovém prostoru
s	m	rozteč mezi trubkami
S	m^2	výhřevná plocha výměníku
S_1	m^2	celkový průtočný průřez
S_2	m^2	celkový průtočný průřez
t_1	$^\circ\text{C}$	střední teplota plynu
t_{11}, t_{12}	$^\circ\text{C}$	teplota plynu na vstupu a výstupu
t_2	$^\circ\text{C}$	střední teplota vzduchu
t_{21}, t_{22}	$^\circ\text{C}$	teplota vzduchu na vstupu a výstupu
u_1	m/s	rychlost pracovní látky v trubce
u_2	m/s	rychlost pracovní látky v mezitrubkovém prostoru
		vlastností kapaliny v mezní vrstvě
y_1	1	součinitel zohledňující vliv nátok pracovní látky
y_2	1	korekční faktor zohledňující změnu látkových
α_1	$\text{W/m}^2\text{K}$	součinitel přestupu tepla z ohřívací látky do stěny

α_2	W/m ² K	součinitel přestupu tepla ze stěny do ohřívané látky
$\bar{\Delta t}_{\ln}$	°C	střední logaritmický teplotní spád
Δt_{\max}	°C	rozdíl teplot t_{11} , t_{22}
Δt_{\min}	°C	rozdíl teplot t_{12} , t_{21}
η_1	Pa·s	dynamická viskozita plynu
η_2	Pa·s	dynamická viskozita vzduchu při 160°C
λ	W/mK	součinitel tepelné vodivosti nerez oceli
λ_1	W/mK	součinitel tepelné vodivosti plynu
λ_2	W/mK	součinitel tepelné vodivosti vzduchu při 160°C
ν_1	m ² /s	kinematická viskozita plynu
ν_2	m ² /s	kinematická viskozita vzduchu při 160°C
ρ_1	kg/m ³	hustota plynu
ρ_2	kg/m ³	hustota vzduchu při 160°C
ρ_{2V}	kg/m ³	hustota vzduchu na vstupu 20°C